

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



*Estudio y Simulación Acústica del Auditorio
de la Universidad Carlos III de Madrid*

AUTOR: PEDRO DE LOS REYES SÁNCHEZ
TUTOR: LUIS ANTONIO AZPICUETA RUIZ
GRADO EN INGENIERÍA DE SISTEMAS AUDIOVISUALES

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todos aquellos que han formado parte de este trabajo, haciendo posible que pudiese ser llevado a cabo.

Gracias a Luis, mi tutor, por la oportunidad de realizar este trabajo, por todo el soporte que me ha prestado durante el mismo y toda la paciencia que ha tenido conmigo y mis dudas. Gracias además por ser el responsable de mi interés por la acústica, desde que le tuve como profesor en el segundo año de grado.

Gracias a Salvador, por mis incesantes correos sobre mis idas y venidas al auditorio y toda la información que me ha facilitado del mismo.

Gracias a Aitor, por comerse todas esas tardes ayudándome en la medida del Auditorio.

Agradecer a los compañeros del DT Team soportar toda mi ilusión por el trabajo, y sus buenos consejos al respecto.

A mi familia, por todo el apoyo que me ha prestado desde el principio.

Y, por último, a mis amigos. A Sergio S., por acompañarme durante estos años de carrera. Agradecer a Héctor, quien me ha resuelto todas mis dudas sobre AutoCAD e interpretación de planos. A Sergio, por estar siempre ahí y preocuparse por mí. A David y sus ganas de fiesta. A Carlos, por escuchar todos mis progresos durante esas cenas en ParqueSur y, especialmente, a Sheila, porque en este último año se ha convertido en alguien indispensable en mi vida con su gran amistad y su corazón de oro.

Apenas os puedo dedicar una líneas de este proyecto, pero sin vuestra ayuda no hubiera sido posible realizarlo. ¡Muchas Gracias!

Índice general

Agradecimientos	3
Resumen	16
1. Introduction	18
1.1. Acoustic Basics	19
1.2. Room Acoustics	22
2. Tipos de Recintos según su Acústica	25
2.1. Recintos dedicados a la Palabra	25
2.1.1. Ruido de Fondo	26
2.1.2. Tiempo de Reverberación (RT)	26
2.1.3. Claridad de la Voz (C_{50})	28
2.1.4. Definición (D)	28
2.1.5. Relación de Primeras Reflexiones (ERR)	29
2.1.6. %ALCons y STI/RASTI	29
2.1.7. Fuerza Sonora (G)	31
2.2. Recintos dedicados a la Música	31
2.2.1. Tiempo de Reverberación (RT)	32
2.2.2. Early Decay Time (EDT)	32
2.2.3. Fuerza Sonora y Ruido de Fondo	33
2.2.4. Claridad de la Música (C_{80})	33
2.2.5. Bass Ratio (BR) y Brillo (Br)	34
2.2.6. Energía Lateral Precoz (J_{LF})	34
2.2.7. Correlación Cruzada Interaural Precoz ($IACC_E$)	35
2.2.8. Energía Lateral Tardía (L_J)	36
2.2.9. Correlación Cruzada Interaural Tardía ($IACC_L$)	36
2.2.10. Soporte Precoz y Tardío	37
2.3. Recintos Multifuncionales	37
3. Auditorio Padre Soler	39

4. Creación del Modelo 3D	42
4.1. Construcción mediante Software del Auditorio	42
4.1.1. Creación de la Geometría de la Sala	43
5. Medición en el Recinto	51
5.1. Mediciones para el Ajuste del Modelo	51
5.1.1. Equipo usado en las Mediciones para el Ajuste del Modelo	51
5.1.2. Puntos de Medición en el Recinto	52
5.1.3. Procedimiento de Medida	56
5.1.4. Datos obtenidos	58
5.2. Mediciones para la Caracterización del Recinto	63
5.2.1. Equipo usado en las Mediciones para la Caracterización del Recinto	63
5.2.2. Puntos de Medición en el Recinto	64
5.2.3. Procedimiento de Medida	66
5.2.4. Datos obtenidos	69
6. Ajuste del Modelo 3D y Simulación	74
6.1. Inserción de los Elementos Restantes y Ajuste del Modelo	74
6.2. Obtención de las Propiedades Acústicas del Auditorio	82
7. Resultados y Comparaciones	87
7.1. Resultados aportados por la Medición In Situ	87
7.1.1. Ruido de Fondo	87
7.1.2. Tiempo de Reverberación	89
7.2. Resultados aportados por las Simulaciones de EASE	93
7.2.1. Direct SPL	94
7.2.2. Total SPL	95
7.2.3. T30	97
7.2.4. EDT	98
7.2.5. C80	99
7.2.6. Lateral Fraction	100
7.2.7. Sound Strength	101
7.2.8. Echo Music	102
8. Conclusions	104
9. Marco Regulador, Planificación y Presupuesto	106
9.1. Marco Regulador	106
9.2. Planificación	106
9.3. Presupuesto	109
Anexos	110

Índice de figuras

1.1. Isophonic Curves of Fletcher - Munson.	20
1.2. Relation between acoustic power, insensity and distance in sound propagation.	23
1.3. ETC Curve and its different areas.	23
1.4. Evolution of the direct and reverberant level in function of distance to the sound source.	24
2.1. Valores máximos para las curvas NC en frecuencia.	27
2.2. Enmascaramiento temporal del habla.	27
2.3. Cálculo de %ALCons de acuerdo a RT y diferencia de niveles de campo sonoro directo y reverberante.	30
2.4. Correspondencia entre %ALCons y STI/RASTI.	31
2.5. Diagrama de directividad de un micrófono bidireccional.	35
3.1. Vista exterior del Auditorio Padre Soler.	39
3.2. Auditorio preparado para acoger una conferencia.	40
3.3. Zona de audiencia vista desde el escenario.	41
3.4. Nomenclatura de las distintas zonas de butacas.	41
4.1. Plano de Planta del Auditorio.	44
4.2. Plano de Sección del Auditorio.	44
4.3. Proceso de creación del modelo.	45
4.4. Modelo finalizado en vista de perspectiva.	45
4.5. Modelo finalizado en vista de alzado.	46
4.6. Modelo finalizado en vista de planta.	47
4.7. Modelo finalizado en vista de perfil.	48
4.8. Colocación de los elementos de la cámara negra.	48
4.9. Vista de los elementos de la cámara negra desde el último asiento de la primera fila de espectadores.	49
4.10. Vista arquitectónica del recinto.	49
4.11. Vista de la audiencia en luces y sombras usando un foco luminoso omnidireccional en la parte central del escenario.	50
5.1. Sonómetro usado en las medidas en el recinto con la pantalla antiviento.	52

5.2. Posiciones de fuente sonora utilizadas para las medidas en el recinto.	53
5.3. Posiciones de micrófono utilizadas para el ajuste del modelo.	54
5.4. Configuración del analizador sonoro para las medidas de ajuste del modelo.	57
5.5. Preparación de las medidas con el estallido de globos.	57
5.6. Curva ETC y el resultado de la integral de Schröeder en color rojo.	59
5.7. Tiempos de reverberación obtenidos en cada medida para el ajuste del modelo.	60
5.8. Altavoz dodecaédrico usado en las mediciones del tiempo de reverberación.	63
5.9. Densidad espectral de potencia del ruido rosa.	64
5.10. Generador de ruido blanco y rosa (arriba) conectado a la etapa de potencia (abajo) en la entrada A.	65
5.11. Posiciones de micrófono usadas para la caracterización del auditorio.	65
5.12. Caída tras el cese de la emisión sonora.	66
5.13. Configuración del analizador sonoro para las medidas de caracterización del recinto.	68
5.14. Analizador sonoro midiendo el ruido de fondo.	69
5.15. Curvas de decrecimiento de nivel observadas mediante dBBATI.	71
5.16. Curva de decrecimiento a la frecuencia de 125 Hz y el cálculo del tiempo de reverbe- ración que proporciona dBBATI (34,11 s). Se observa en rojo el nivel estacionario, en azul la caída tras el cese de la emisión y en verde el nivel de ruido de fondo.	72
5.17. Curva de decrecimiento a la frecuencia de 125 Hz y cálculo del tiempo de reverbera- ción tras el ajuste manual (2,70 s).	72
5.18. Curva de decrecimiento a la frecuencia de 3.15 kHz.	73
6.1. Recinto finalizado con la inserción de las áreas de audiencia.	75
6.2. Índice de directividad de la fuente esférica.	75
6.3. Modelo con áreas de audiencia (verde), altavoces (azul) y asientos de escucha (marrón).	76
6.4. Configuración de las opciones y altavoces en AURA Mapping.	77
6.5. Configuración los asientos y áreas en AURA Mapping.	78
6.6. Configuración del ruido de fondo en AURA Mapping.	78
6.7. Configuración de los parámetros de la simulación en AURA Mapping.	79
6.8. T30 simulado con AURA.	80
6.9. Ecograma con integración de Schröeder y tiempo de reverberación calculado por AURA.	80
6.10. Ventana de Optimize RT.	81
6.11. Comparación entre los tiempos de reverberación medidos in-situ y simulados para una posición del escenario.	83
6.12. Comparación entre los tiempos de reverberación medidos in-situ y simulados para una posición de la zona de butacas.	84
6.13. Nivel directo (L_D) y reverberante (L_R) en función de la distancia a la fuente sonora.	84
7.1. Comparación de los niveles de ruido de fondo medidos in-situ con las curvas NC recomendadas.	89

7.2. Tiempo de reverberación medido <i>in situ</i> y simulado en el punto anómalo (Fuente A, Micrófono 1).	90
7.3. Camino seguido por las reflexiones hasta orden 5 en el punto anómalo (Fuente A, Micrófono 1).	91
7.4. Comparación del tiempo de reverberación obtenido en las distintas posiciones de una misma audiencia.	92
7.5. Comparación del tiempo de reverberación entre las distintas áreas de audiencia de la sala.	93
7.6. Valores del parámetro Direct SPL a la frecuencia de 100 Hz.	95
7.7. Valores del parámetro Direct SPL a la frecuencia de 10 kHz.	95
7.8. Valores del parámetro Total SPL a la frecuencia de 1 kHz.	96
7.9. Comparación entre el tiempo de reverberación obtenido con las medidas <i>in situ</i> para caracterización y el promedio obtenido de la simulación de AURA.	97
7.10. Valores del parámetro T30 a la frecuencia de 1 kHz.	98
7.11. Valores del parámetro EDT a la frecuencia de 1 kHz.	99
7.12. Valores del parámetro C80 a la frecuencia de 1 kHz.	100
7.13. Valores del parámetro Lateral Fraction a la frecuencia de 1 kHz.	101
7.14. Valores del parámetro Sound Strength a la frecuencia de 1 kHz.	102
7.15. Valores del parámetro Echo Music a la frecuencia de 1 kHz.	103
9.1. Diagrama PERT de la realización del proyecto. En rojo, el camino crítico.	107
B.1. Coeficiente de absorción acústica del pladur utilizado en el modelo.	119
B.2. Coeficiente de absorción acústica del cristal utilizado en el modelo.	119
B.3. Coeficiente de absorción acústica del acero utilizado en el modelo.	120
B.4. Coeficiente de absorción acústica del linóleo utilizado en el modelo.	120
B.5. Coeficiente de absorción acústica de los paneles de contrachapado utilizados en el modelo.	121
B.6. Coeficiente de absorción acústica del revestimiento textil de muros utilizado en el modelo.	122
B.7. Coeficiente de absorción acústica del cortinaje utilizado en el modelo.	122
B.8. Coeficiente de absorción acústica de las butacas utilizadas en el modelo.	123
B.9. Distribución de los materiales usados en el modelo.	123
C.1. Valores del parámetro Direct SPL a la frecuencia de 125 Hz.	124
C.2. Valores del parámetro Direct SPL a la frecuencia de 250 Hz.	125
C.3. Valores del parámetro Direct SPL a la frecuencia de 500 Hz.	125
C.4. Valores del parámetro Direct SPL a la frecuencia de 1 kHz.	126
C.5. Valores del parámetro Direct SPL a la frecuencia de 2 kHz.	126
C.6. Valores del parámetro Direct SPL a la frecuencia de 4 kHz.	127
C.7. Valores del parámetro Total SPL a la frecuencia de 125 Hz.	127
C.8. Valores del parámetro Total SPL a la frecuencia de 250 Hz.	128
C.9. Valores del parámetro Total SPL a la frecuencia de 500 Hz.	128

C.10. Valores del parámetro Total SPL a la frecuencia de 1 kHz.	129
C.11. Valores del parámetro Total SPL a la frecuencia de 2 kHz.	129
C.12. Valores del parámetro Total SPL a la frecuencia de 4 kHz.	130
C.13. Valores del parámetro T30 a la frecuencia de 125 Hz.	130
C.14. Valores del parámetro T30 a la frecuencia de 250 Hz.	131
C.15. Valores del parámetro T30 a la frecuencia de 500 Hz.	131
C.16. Valores del parámetro T30 a la frecuencia de 1 kHz.	132
C.17. Valores del parámetro T30 a la frecuencia de 2 kHz.	132
C.18. Valores del parámetro T30 a la frecuencia de 4 kHz.	133
C.19. Valores del parámetro EDT a la frecuencia de 125 Hz.	133
C.20. Valores del parámetro EDT a la frecuencia de 250 Hz.	134
C.21. Valores del parámetro EDT a la frecuencia de 500 Hz.	134
C.22. Valores del parámetro EDT a la frecuencia de 1 kHz.	135
C.23. Valores del parámetro EDT a la frecuencia de 2 kHz.	135
C.24. Valores del parámetro EDT a la frecuencia de 4 kHz.	136
C.25. Valores del parámetro C80 a la frecuencia de 125 Hz.	136
C.26. Valores del parámetro C80 a la frecuencia de 250 Hz.	137
C.27. Valores del parámetro C80 a la frecuencia de 500 Hz.	137
C.28. Valores del parámetro C80 a la frecuencia de 1 kHz.	138
C.29. Valores del parámetro C80 a la frecuencia de 2 kHz.	138
C.30. Valores del parámetro C80 a la frecuencia de 4 kHz.	139
C.31. Valores del parámetro Lateral Fraction a la frecuencia de 125 Hz.	139
C.32. Valores del parámetro Lateral Fraction a la frecuencia de 250 Hz.	140
C.33. Valores del parámetro Lateral Fraction a la frecuencia de 500 Hz.	140
C.34. Valores del parámetro Lateral Fraction a la frecuencia de 1 kHz.	141
C.35. Valores del parámetro Lateral Fraction a la frecuencia de 2 kHz.	141
C.36. Valores del parámetro Lateral Fraction a la frecuencia de 4 kHz.	142
C.37. Valores del parámetro Sound Strength a la frecuencia de 125 Hz.	142
C.38. Valores del parámetro Sound Strength a la frecuencia de 250 Hz.	143
C.39. Valores del parámetro Sound Strength a la frecuencia de 500 Hz.	143
C.40. Valores del parámetro Sound Strength a la frecuencia de 1 kHz.	144
C.41. Valores del parámetro Sound Strength a la frecuencia de 2 kHz.	144
C.42. Valores del parámetro Sound Strength a la frecuencia de 4 kHz.	145
C.43. Valores del parámetro Echo Music a la frecuencia de 125 Hz.	145
C.44. Valores del parámetro Echo Music a la frecuencia de 250 Hz.	146
C.45. Valores del parámetro Echo Music a la frecuencia de 500 Hz.	146
C.46. Valores del parámetro Echo Music a la frecuencia de 1 kHz.	147
C.47. Valores del parámetro Echo Music a la frecuencia de 2 kHz.	147
C.48. Valores del parámetro Echo Music a la frecuencia de 4 kHz.	148
D.1. Reverberation times obtained on every audience area.	151

D.2. Noise Floor on the Auditorium.	152
D.3. EDT Values at 500Hz.	153

Índice de tablas

1.1. Center frequencies of octave and 1/3 octave standarized filters.	22
2.1. Curvas NC recomendadas para diferentes recintos.	26
2.2. Correspondencia entre parámetros e inteligibilidad percibida.	30
2.3. Valores recomendados del RT en función del tipo de música interpretado (Valores para recintos ocupados).	32
5.1. Ubicación de las diferentes posiciones de fuente y micrófono utilizadas para las medidas de ajuste del modelo.	55
5.2. Tiempos de reverberación obtenidos en las medidas de ajuste del modelo.	61
5.3. Incertidumbre de los resultados de las medidas de ajuste del modelo.	62
5.4. Descripción de las posiciones de micrófono usadas para la caracterización del auditorio.	67
5.5. Valores del Ruido de Fondo presentes en el recinto en bandas de 1/3 de octava.	70
6.1. Porcentaje de acierto en los valores del tiempo de reverberación con el ajuste del modelo.	82
7.1. Curvas NC recomendadas para diferentes tipos de salas.	88
7.2. Valores en dB de las curvas NC en bandas de octava.	88
7.3. Valores en dB de las curvas NC en bandas de 1/3 octava.	89
7.4. Valores del tiempo de reverberación (en segundos) tras el promedio por áreas de audiencia.	92
7.5. Incertidumbre del tiempo de reverberación (en segundos) tras el promedio por áreas de audiencia.	92
9.1. Presupuesto necesario para la realización de este proyecto.	109
A.1. Tiempos de reverberación obtenidos en las posiciones de micrófono con la fuente en la posición A.	112
A.2. Tiempos de reverberación obtenidos en las posiciones de micrófono con la fuente en la posición B.	113
A.3. Tiempos de reverberación obtenidos en las posiciones de micrófono con la fuente en la posición C.	114

A.4. Incertidumbre de la medida del tiempo de reverberación con la fuente en la posición	
A.	115
A.5. Incertidumbre de la medida del tiempo de reverberación con la fuente en la posición	
B.	116
A.6. Incertidumbre de la medida del tiempo de reverberación con la fuente en la posición	
C.	117

Resumen

En este documento se realiza un estudio acústico del Auditorio de la Universidad Carlos III de Madrid, denominado auditorio Padre Soler y ubicado en Leganés, en el campus de la Universidad Carlos III de Madrid.

Aunque el auditorio se utiliza con fines muy variados, el estudio se ha llevado a cabo desde el punto de vista de su uso como espacio para la música, dado que en su construcción se diseñó con el objetivo de tener una buena calidad para este tipo de espectáculos.

El trabajo se puede dividir en tres grandes partes. Una introducción teórica considerando los conceptos necesarios para entender la acústica arquitectónica y su importancia a la hora de diseñar un recinto, la simulación acústica del auditorio mediante el software EASE y la caracterización acústica del recinto mediante mediciones.

En la introducción teórica se recoge un breve repaso de los conceptos básicos de la acústica y la acústica de recintos. También se realiza una descripción de los diferentes parámetros utilizados para cualificar objetivamente la idoneidad de un espacio, sabiendo que se va a utilizar para un fin acústico concreto.

La simulación con software es una buena herramienta para comprobar que el recinto va a ser idóneo acústicamente antes de ser construido y cuáles son los materiales que se deberían usar en su construcción, desde el punto de vista acústico. En este caso, dado que el recinto ya se encuentra construido, contar con un modelo virtual del auditorio permite realizar una comprobación exhaustiva de sus propiedades acústicas. Además, dicho modelo virtual también permitiría llevar a cabo procesos de auralización, mediante los cuáles se puede simular cómo sonaría una interpretación en dicho recinto, sin necesidad de estar dentro del mismo. Por último, se puede evaluar el efecto de cualquier modificación que se pretenda realizar sobre la acústica del recinto, antes de que sea llevada a cabo.

Las mediciones *in situ* permiten evaluar el espacio acústico en su estado actual, pudiendo obtenerse diferentes parámetros acústicos e incluso identificar los defectos acústicos que puedan existir en el recinto.

En este proyecto se han realizado mediciones con dos objetivos diferentes. El primero de ellos ha sido ajustar el modelo virtual creado con EASE. De esta forma se asegura que el modelo software representa fielmente el recinto existente. Para este propósito, se ha medido la respuesta al impulso de la sala utilizando como excitación acústica el estallido de globos (cuya respuesta es similar a una delta de Dirac).

El segundo objetivo de las mediciones ha sido la caracterización acústica del auditorio. Concretamente, se ha cuantificado el tiempo de reverberación del recinto. Estas mediciones han sido llevadas a cabo siguiendo el método de la fuente interrumpida, usando como fuente de señal un altavoz dodecaédrico emitiendo un ruido de banda ancha.

Todas las mediciones han sido realizadas de acuerdo a la norma internacional UNE-EN ISO 3382-1:2009.

Finalmente, en los diferentes anexos del documento se presentarán todos los valores de los tiempos de reverberación obtenidos mediante la medición *in situ* para la caracterización de la sala, los coeficientes de absorción acústica de los materiales usados para la simulación del auditorio, así como su distribución y los datos obtenidos a partir de la simulación software.

Chapter 1

Introduction

This document focuses on the acoustic study of Padre Soler Auditorium, located in Leganés, in the campus of Carlos III University of Madrid. This study belongs to the field of room acoustics science, which studies the acoustic field inside the architectural spaces, either closed or open enclosures.

Indisputably, the places and enclosures affect listening in a significant way. Its not unusual seeing musicians and street performers trying to be heard in a crowded area, we can go to a theater to see a performance in which every word can be heard, or even we can go to church, where priests voice turns off slowly. In the previous examples, floor noise and reverberation time effect have been highlighted. In the theater, intelligibility is the property marked and it depends on the floor noise and reverberation time, besides other factors. All these concepts are studied in room acoustics.

Also, as there are spaces designed to have a proper acoustic for its purpose, like a theater, its easy realize that it is essential to adapt the acoustic of the room if it isn't suitable for a concrete event. For example, the adaptation of a sport stadium when celebrating a concert.

Once the importance of room acoustics has been shown, I would like to tell my motivations to choose this project. The acoustic science has always interested me. In fact, I have chosen *Audiovisual Systems Engineering Degree* because of this interest. During my degree years I've learnt the basics of room acoustics, and this project has helped me to go deeper into this area.

The Final Degree Project which is explained in this document is motivated by the author interest in acoustic science. With this project, had been possible to take a close look at room acoustics field. In fact, the election of the enclosure under study has been motivated by the interest in performing acoustic measurements *in situ*. Studying an enclosure that belongs to university, gives the possibility to use the acoustic laboratory equipment and to obtain the necessary permits to reserve the room during measurements. In addition, the acoustic study of the auditorium is difficult due to the amount of acoustic properties required to be assess positively. This way, concepts of room acoustics have been learnt that otherwise haven't been possible.

1.1. Acoustic Basics

The sound is produced by a vibrating element. This vibration is transmitted to the adjacent air particles near the vibrating element. Also, these particles transmit the vibration to the adjacent particles. Thereby, the vibratory movement of sound source is transmitted through the space at a speed which depends on atmospheric pressure and temperature. Under normal conditions of atmospheric pressure (1 atmosphere), the temperature's dependence is reflected in [Equation 1.1], with a speed of propagation close to 343 m/s at 20 °C.

$$c = (331,4 + 0,6 \theta) [m/s] \quad (1.1)$$

where θ is the temperature, expressed in °C.

The received vibration generates quick variations of pressure around atmospheric pressure, whose value is almost constant, as it varies much more slowly. These variations of pressure are used to measure received sound. Due to the quick variation of received pressure, the quantified magnitude that is measured is the effective value of pressure [Equation 1.2].

$$p_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p^2(t) dt} \quad (1.2)$$

where $p(t)$ is the acoustic instantaneous value of pressure and T is the wave period.

The effective value of pressure is quantified using the unit Pascals (Pa). However, this magnitude isn't appropriate to quantify sound pressure, due to the wide range of dynamic sounds that human ear can respond, and ear doesn't respond in a linear way to changes of pressure, but logarithmically. Thus, we'll perceive the sonority of a sound as twice when received pressure is multiplied by a 3,16 factor (at 1 kHz). For these two reasons, decibel (dB), a logarithmic magnitude, is used to quantify sound pressure. This pressure is called sound pressure level, and denoted by L_p or SPL ("Sound Pressure Level"), whose calculation is shown in [Equation 1.3].

$$SPL = 10 \log \left(\frac{p_{ef}}{p_0} \right)^2 [dB] \quad (1.3)$$

where p_{ef} is the effective value of pressure and p_0 is the acoustic reference pressure and equals to 20 μPa .

The term p_0 in [Equation 1.3] is used because 20 μPa equals to the minimum threshold of pressure that a human can hear. Thus, a sound pressure level of 0 dB equals to the minimum audible sound and an increase of 10 dB in sound pressure level equals twice the perceived sonority. Pain threshold is located at a pressure level of 120130 dB .

The sound spectrum has a great importance in acoustic science. A pure tone is a sound only composed by a single frequency. Most of musical instruments produce a sound with a fundamental frequency and successive harmonics, frequencies which are multiples of the fundamental. All sounds whose frequency spectrum is random are framed under the heading of noise. In this way, white noise is a random noise whose spectrum is flat, with some power and randomness. It is possible to calculate the average power per unit of frequency for different noises. This value is known as power spectral density. It is impossible to calculate the noise power at a frequency in a given instant, since the process is random.

For a young and healthy person, the audible frequency range is setted between 20 Hz and 20 kHz. As the age of the person increases, it's common this range is reduced. However, our ear's sensibility differs with frequency. *Fletcher-Munson* isophonic curves show this, representing curves with the same loudness for different sound pressure levels [Figure 1.1]. The A weighting scale, widely used in other acoustic fields, is the inverse of the isophonic curve of 40 phons.

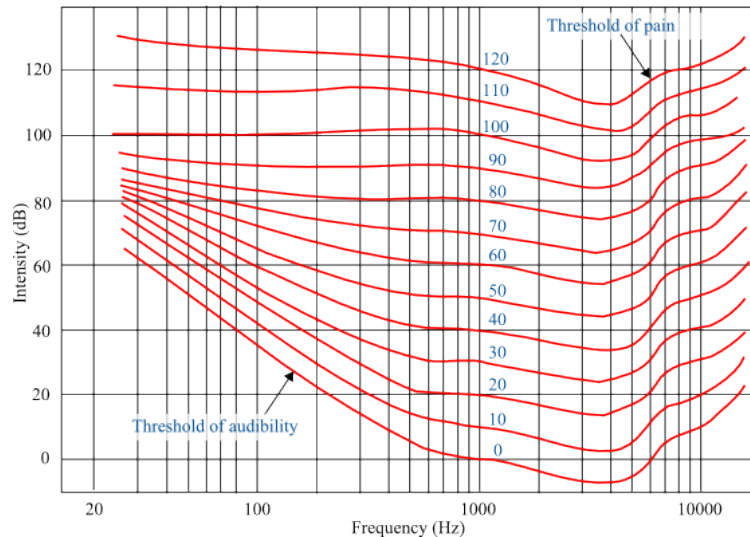


Figure 1.1. *Isophonic Curves of Fletcher - Munson.*

A sonometer is a device used for sound pressure level measurement and it is composed of a microphone that adquire the acoustic signal, a preamplifier of the transduced electric signal and the necessary equipment of signal processing for the calculation of sound pressure level, that it is shown to the user, either in an analog or digital way, or even a combination of both (the visual integration of a variable level is easier to do when the value representation is analogic).

In most occasions, as well as obtaining sound pressure level, it is neccesary to perform a time average of pressure with a larger average time. For this purpose, integrator sonometers are used. They are devices that are able to calculate a *continious equivalent pressure level* L_{eq} [Equation 1.4].

$$L_{eq} = 10 \log \frac{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p^2(t) dt}{p_0^2} [dB] \quad (1.4)$$

where T is the average time of measure, $p(t)$ is the instantaneous acoustic pressure and p_0 is the reference pressure value, $20 \mu Pa$.

One last complex version of a sonometer is the sonometer named *sound analyzer*, device that can be used as a integrator sonometer and, thanks to a filter bank, analyze the spectral components of the sound received. These filters have a percentual bandwidth, following the standars. Most common filters are those whose bandwidth are a 1/3 octave and a 1/1 octave. A 1/1 octave filter will have a bandwidth between a given frequency and its double frequency [Equation 1.5]. The relation between upper and lower frequency on a 1/3 octave filter appears in [Equation 1.6].

$$f_s = 2f_i \quad (1.5)$$

$$f_s = f_i \sqrt[3]{2} \quad (1.6)$$

where f_i is the lower frequency of the filter and f_s is the upper frequency of the filter.

Normally, percentual filters (of 1/1 octave and also octave fractions) are identified with its center frequency (f_c), which can be defined as:

$$f_c = \sqrt{f_i f_s} \quad (1.7)$$

Working on previous equations, is it possible to establish the bandwidth of a filter in function of its center frequency. [Equation 1.8] for an octave filter and [Equation 1.6] for a 1/3 octave filter.

$$B = 0,71f_c \quad (1.8)$$

$$B = 0,23f_c \quad (1.9)$$

The different standarized center frequencies for a 1/3 and 1/1 octave filter are in [Table 1.1].

Concerning to this project, the equiment that has been used in the different measurements is a sound analyzer. The main octave bands consider in the different significance parameters of room acoustics, are those whose center frequency is covered between 125 Hz and 4 kHz (the norm used in the different measurements denotes that in engineering or accurate method, at leats, these frequencies have to be considered), even though greater and greater, the acoustic studies consider a wide range of frequencies.

Octave center frequency (Hz)	1/3 Octave center frequency (Hz)	Octave center frequency (Hz)	1/3 Octave center frequency (Hz)
31.5	25	1000	800
	31.5		1000
	40		1250
63	50	2000	1600
	63		2000
	80		2500
125	100	4000	3150
	125		4000
	160		5000
250	200	8000	6300
	250		8000
	315		10000
500	400	16000	12500
	500		16000
	630		20000

Table 1.1. Center frequencies of octave and 1/3 octave standardized filters.

1.2. Room Acoustics

In a room, when a sound is generated, the sound propagates in every direction of space (with more or less importance in a certain direction, because of the sound source's directivity). The sound receiver gets two main components of sound: direct sound, which comes straightaway from the sound source, with no intervention of any other element, and the reflected sound, which comes from the distincts reflexions on the room's surfaces and objects inside the enclosure.

The direct sound propagation from source to receiver happens in a spherical way. Considering a free field state (where the sound recieved is due to just direct sound, with no reflexions), while the sound propagates in a spherical way, the energy contained in a sphere with lower dimensions is distributed in a sphere with bigger dimensions, because the acoustic power of source must remain constant [Figure 1.2]. This propagation law is called as spherical divergence. The effective value of pressure decreases as $1/r$, where r is the distance between source and receiver. Interpreting this law as logarithmically, sound pressure level recieved decays 6 *dB* every time the distance to the sound source is doubled. As a reminder, the decreasing of 6 *dB* happens only with the direct sound, so the sound pressure level won't decrease in this way at normal conditions, due to the contribution of direct and reflected sound.

As already been comented, the sound that a listener receives has two main components, direct sound and reflected sound. Going deeper, we can say that the sound recieved will have direct component, primary or early reflexions (whose order is small, knowing as "order n" the reflexions that impact "n" times on the room surfaces before get recieved), which level will be high, and the

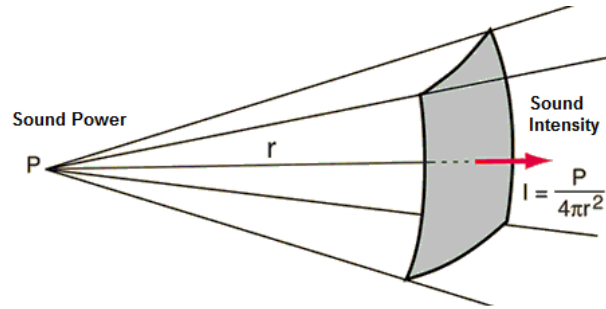


Figure 1.2. Relation between acoustic power, intensity and distance in sound propagation.

reverberation tail, the group of reflexions that impact to a lot of room's surfaces and, because of that, will be received with a lot of attenuation. An easy method to obtain those components of sound, is recording the acoustic impulse response, an intensity and short sound. The [Figure 1.3] shows the energy decay curve, also known as *ETC* (*Energy-Time Curve*), the curve that could be obtained from the measurement of an impulse response, labeled with the direct sound, early reflexions and reverberation tail. This ETC curve, when generated by means of the recording of an impulse response, can be used as the main component for the calculation of an amount of parameters in room acoustics, due to some parameters are calculated as an energetic relation between various temporal margins of the measured impulse response.

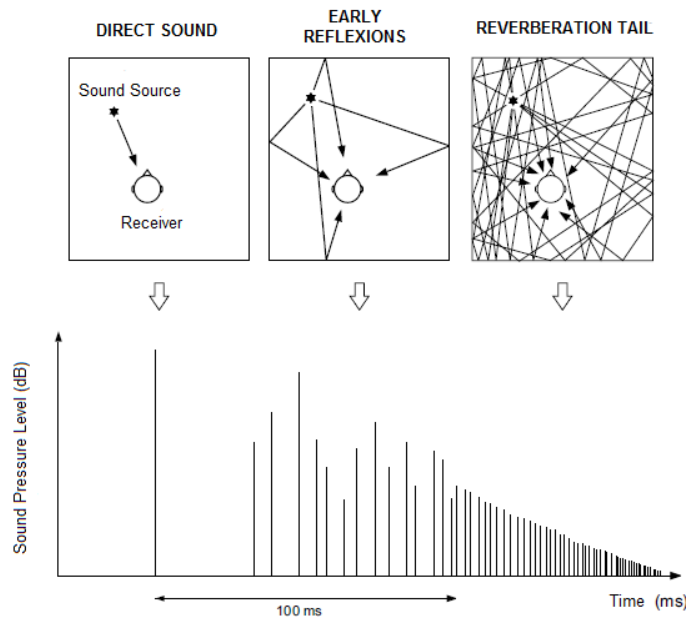


Figure 1.3. ETC Curve and its different areas.

As the ending of this brief introduction, it is necessary to talk about direct field and reverberant field, concepts that will be used in the consecutive chapters of this document. Approximating the reflected sound inside a room as a constant value, that doesn't depend on the position in the room, the energy received in a point of measure, will have a variable component (direct sound, decreasing

with the distance to the sound source, following the spherical divergence theorem) and a constant component, value of energy from the diverse reflexions of sound. The area where main component is the direct sound is called direct field [Figure 1.4]. Likewise, area where main component is the reflexion's energy, is called reverberant field. Critical distance is the distance to the sound source where the energy of both components is equal. The fact of approximating the group of reflexions to a constant value that doesn't depend on the point under study, is an approximation used by the statistics theory and it simplifies the calculation of the total energy.

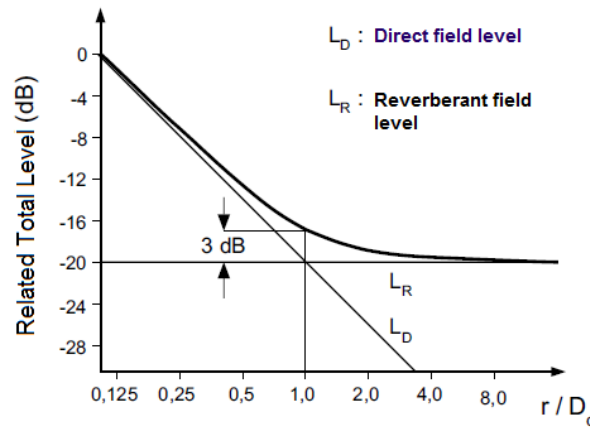


Figure 1.4. Evolution of the direct and reverberant level in function of distance to the sound source.

Capítulo 2

Tipos de Recintos según su Acústica

Es fundamental conocer el propósito que va a tener un recinto antes de ser construído, ya que su acústica debe adecuarse a su función. Del mismo modo, existen ciertos parámetros indicadores de la calidad de un recinto cuando se utiliza para un fin determinado.

A continuación se realizará una revisión teórica de la mayoría de parámetros utilizados para caracterizar un recinto acústicamente, si bien en la caracterización del auditorio bajo estudio no se han utilizado todos ellos. La gran mayoría de parámetros que se definirán posteriormente en este capítulo pueden ser calculados a partir de la respuesta al impulso registrada mediante un micrófono omnidireccional. Dicho impulso acústico deberá ser generado en la posición habitual de la fuente sonora, el escenario, si el recinto dispone de uno. El micrófono deberá ser situado sobre la posición habitual de un oyente, el área de audiencia, si el recinto lo permite. La única excepción de la colocación del micrófono será la medida del soporte, en la que el micrófono deberá situarse sobre el escenario. Por tanto, en lo sucesivo del capítulo, si no se especifica otro método, para el cálculo de los diferentes parámetros será necesario obtener previamente el ecograma resultante de la respuesta al impulso registrada por un micrófono omnidireccional.

Podemos distinguir tres grandes grupos de espacios cerrados según su acústica: *Recintos dedicados a la palabra*, *recintos dedicados a la música* y *recintos multifuncionales*.

2.1. Recintos dedicados a la Palabra

En una sala de conferencias o un aula es necesario que cualquier mensaje oral sea inteligible. Por ello, este tipo de espacios deberá disponer de una acústica que permita que la inteligibilidad de la palabra sea buena, y a su vez que haya una sensación de confort acústico para evitar fatiga auditiva. Estos dos objetivos dependen en gran medida del nivel de ruido de fondo de la sala, de que el campo reverberante en la misma no sea elevado y de que no existan defectos acústicos, como ecos, coloración ni focalizaciones del sonido.

2.1.1. Ruido de Fondo

El ruido de fondo en el recinto puede deberse a diversos factores, tanto internos al recinto, por ejemplo, el sistema de climatización (cuyo ruido es más importante a baja frecuencia), como externos al recinto, como puede ser ruido que se filtra de otros locales colindantes e incluso tráfico. Si no existe una diferencia de nivel elevada (al menos 12 dB) entre el nivel del ruido de fondo y el nivel del mensaje, la inteligibilidad se verá afectada en gran medida. Se considera que la inteligibilidad no se ve afectada por el ruido de fondo, cuando se cuenta con relaciones señal a ruido (S/N) de al menos 25 dB .

Es habitual usar las **curvas NC (Noise Criteria)** [Figura 2.1] como referencia para las medidas del ruido de fondo del recinto. Los valores recomendados de estas curvas en diferentes tipos de espacios aparecen en la [Tabla 2.1]. Un recinto cumplirá con la especificación NC-X, cuando el ruido de fondo medido en octavas esté por debajo de dicha curva en las bandas de frecuencia central 63 Hz – 8 kHz.

Tipos de recintos	Curva NC recomendada	Equivalencia en dBA
Estudios de grabación	15	28
Salas de conciertos y teatros	15-25	28-38
Hoteles (habitaciones individuales)	20-30	33-42
Salas de conferencias / Aulas	20-30	33-42
Despachos de oficinas / Bibliotecas	30-35	42-46
Hoteles (vestíbulos y pasillos)	35-40	42-46
Restaurantes	35-40	46-50
Salas de ordenadores	35-45	46-55
Cafeterías	40-45	50-55
Polideportivos	40-50	50-60
Talleres (maquinaria ligera)	45-55	55-65
Talleres (maquinaria pesada)	50-65	60-75

Tabla 2.1. Curvas NC recomendadas para diferentes recintos.

2.1.2. Tiempo de Reverberación (RT)

El tiempo de reverberación es el tiempo que tarda en extinguirse el sonido dentro de la sala. Concretamente, es lo que tarda en decrecer el sonido 60 dB por debajo del nivel en estacionario. En la práctica, conseguir un caída de 60 dB desde el nivel estacionario es muy complicado, debido al ruido de fondo, teniendo que conformarse con registrar decaimientos menores y extrapolar. Se puede cuantificar el tiempo en el que se produce un decrecimiento de 30 dB , desde un nivel de 5 dB por debajo del nivel en estacionario a 35 dB menor que dicho nivel, en cuyo caso hay que multiplicar el tiempo obtenido por un factor 2, y se estaría hablando del parámetro T_{30} . En el caso de que se observe un decrecimiento de 20 dB (desde 5 dB por debajo del nivel estacionario), hay que escalar el tiempo obtenido por un factor 3 y el parámetro se denomina T_{20} .

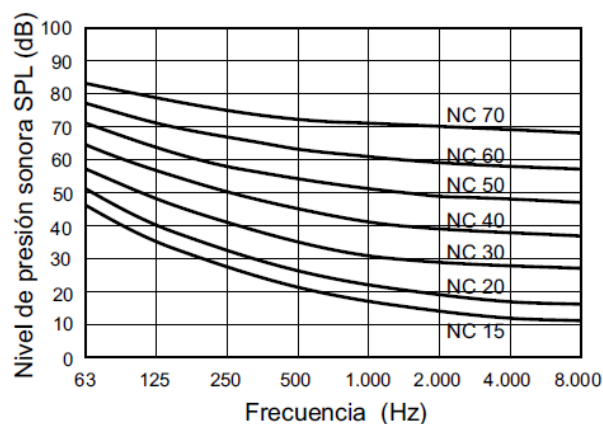


Figura 2.1. Valores máximos para las curvas NC en frecuencia.

Para la correcta inteligibilidad del habla, el tiempo de reverberación debe tomar un valor bajo, preferiblemente no superior a 1,2 segundos (a mayor tamaño del recinto, mayor tiempo de reverberación es permisible). Una sala muy seca o apagada, con un tiempo de reverberación demasiado bajo tampoco es recomendable, dado que a pesar de obtenerse buena inteligibilidad, se producirá fatiga acústica. El aumento del tiempo de reverberación puede provocar una incorrecta inteligibilidad. El tiempo de reverberación suele ser más elevado en bajas frecuencias, debido a la mayor absorción del aire a partir de frecuencias mayores a 2 kHz. El empeoramiento de la inteligibilidad se puede explicar con la diferencia sustancial entre vocales y consonantes. La duración de una vocal es mayor y tiene más contenido en frecuencias graves que una consonante. Por tanto, se obtiene un mayor tiempo de reverberación con la vocal que, unido a su mayor nivel de presión, propicia un enmascaramiento temporal de la vocal a su sucesiva consonante, reduciendo la inteligibilidad del mensaje [Figura 2.2].

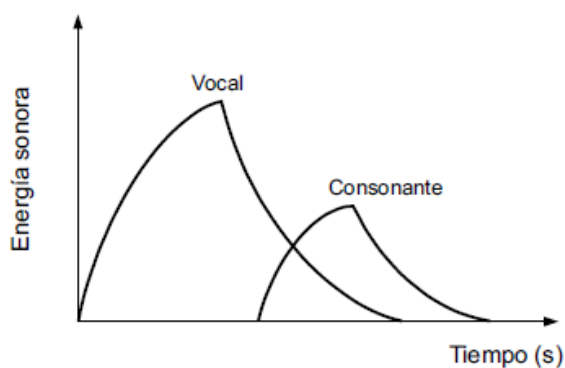


Figura 2.2. Enmascaramiento temporal del habla.

2.1.3. Claridad de la Voz (C_{50})

El parámetro C_{50} es un indicador de la calidad del recinto para la palabra. Su cálculo es una simple relación energética entre la energía que llega al oyente en los primeros 50 ms (incluyendo el sonido directo), y la energía posterior a este instante [Ecuación 2.1].

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{0,05} p^2(t) dt}{\int_{0,05}^{\infty} p^2(t) dt} [dB] \quad (2.1)$$

donde $p(t)$ es la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva medida.

Normalmente, se calcula en las bandas de octava de frecuencia comprendidas entre 125 Hz y 4 kHz, dado que corresponden al rango de frecuencias del habla. El por qué de utilizar 50 ms como límite, se debe a cómo integra nuestro oído la voz. Todas aquellas reflexiones que nos lleguen dentro de los primeros 50 ms serán integradas por nuestro oído junto con el sonido directo, provocando un aumento del nivel percibido. Todas aquellas reflexiones que lleguen al oído tras esos primeros 50 ms y con suficiente nivel, podrían ser captadas como ecos, resultando una escucha incómoda.

Por último, destacar que existe un parámetro conocido como **Speech Average** usado para dar un único valor del C_{50} independiente de la frecuencia, y para su cálculo considera la aportación de cada banda de frecuencia a la inteligibilidad de la palabra [Ecuación 2.2].

$$\begin{aligned} \text{Speech Average} = & 0,15 \cdot C_{50}(500 \text{ Hz}) + 0,25 \cdot C_{50}(1 \text{ kHz}) + \\ & + 0,35 \cdot C_{50}(2 \text{ kHz}) + 0,25 \cdot C_{50}(4 \text{ kHz}) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Cuanto mayor valor tomen los parámetros anteriores, mayor inteligibilidad tendrá el recinto, dado que existirá mayor energía dentro de los primeros 50 ms que será integrada por nuestro oído y menor energía tardía que provoque un aumento del campo reverberante.

2.1.4. Definición (D)

Es un parámetro muy parecido al anterior, C_{50} . La definición (D) es la relación entre la energía recibida en los primeros 50 ms (incluyendo el sonido directo) y la energía total recibida [Ecuación 2.3]. Se suele calcular en cada banda de octava de frecuencia central comprendida entre 125 Hz y 4 kHz.

$$D = \frac{\int_0^{0,05} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.3)$$

Como cabe de esperar, la inteligibilidad aumenta según lo hace este parámetro y conocer el valor que toma la definición (D) determina el valor que toma el parámetro C_{50} [Ecuación 2.4].

$$C_{50} = 10 \cdot \log \frac{D}{1 - D} [dB] \quad (2.4)$$

2.1.5. Relación de Primeras Reflexiones (ERR)

Complementario de los dos anteriores, sirve para cuantificar la cantidad e intensidad de primeras reflexiones en un punto del recinto. Nuevamente, nos encontramos con una relación energética en la que el numerador hace referencia a la energía recibida en los primeros 50 ms, pero esta vez se compara con la energía del sonido directo [Ecuación 2.5].

$$ERR = \frac{\int_0^{0,05} p^2(t) dt}{p_0^2} \quad (2.5)$$

donde p_0 es la presión acústica instantánea correspondiente al sonido directo.

Un valor elevado de este parámetro denotará una mayor cantidad de primeras reflexiones, y con ello del nivel de sonoridad. Es conveniente que el valor obtenido no varíe en gran medida en todo el área de audiencia, lo que significará que las condiciones de escucha son similares en todo el público.

2.1.6. %ALCons y STI/RASTI

Los parámetros anteriores sirven para cualificar un recinto de acuerdo a su uso para la palabra utilizando relaciones energéticas derivadas de la respuesta al impulso medida.

Los siguientes parámetros no se derivan de la respuesta al impulso y aportan información adicional sobre la inteligibilidad del mensaje oral.

%ALCons (Articulation Loss of Consonants) cuantifica en % la cantidad de consonantes no entendidas de un mensaje hablado. Así, a mayor valor de %ALCons, peor será la inteligibilidad en el recinto. El valor de %ALCons se puede obtener a partir del tiempo de reverberación y el conocimiento de la diferencia entre los niveles de presión del campo directo y del campo reverberante [Figura 2.3].

La dependencia de %ALCons con el tiempo de reverberación y la diferencia del campo directo y reverberante es directa. A mayor tiempo de reverberación, aumenta el valor de %ALCons, con lo que se comprueba que la inteligibilidad disminuye. Lo mismo sucede cuando el %ALCons se mide a una distancia mayor de la fuente, dado que el campo directo será menor (debido a la ley de divergencia esférica) y por tanto existirá menor inteligibilidad.

Aunque la mayoría de fuentes comentan que uno de los principales defectos del parámetro %ALCons es que no tiene en cuenta la relación señal a ruido (S/N), que también perjudica la inteligibilidad cuando su valor es bajo, existen modificaciones del ábaco que incluyen el efecto de la relación S/N sobre la inteligibilidad.

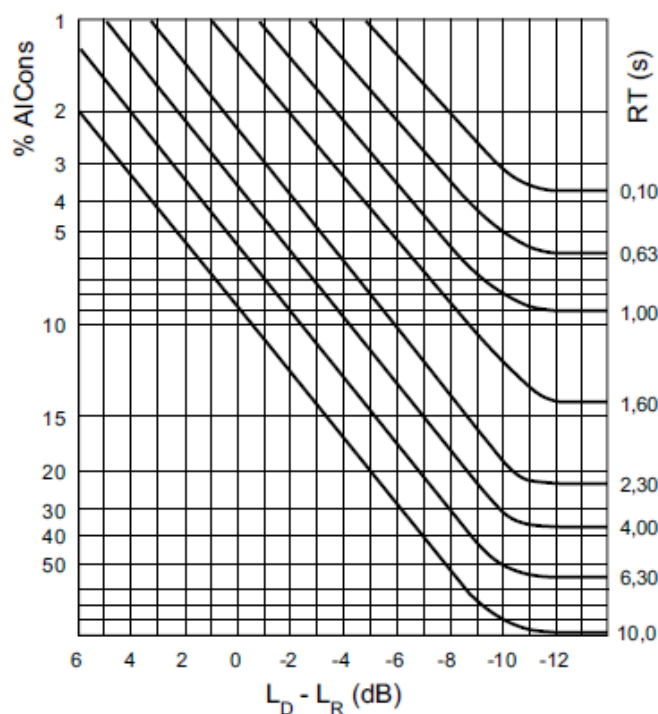


Figura 2.3. Cálculo de %ALCons de acuerdo a RT y diferencia de niveles de campo sonoro directo y reverberante.

STI (Speech Transmission Index) cuantifica el grado de inteligibilidad entre 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad óptima). Para el cálculo del STI influye el ruido de fondo y unos índices de modulación de la voz debidos a la existencia de reverberación.

Como el cálculo del STI es un proceso costoso, muchas veces se utiliza el parámetro **RASTI (Rapid Speech Transmission Index)**, que es una versión simplificada del STI. Entre su simplificación, cabe destacar que se usan simplemente 9 índices de modulación, frente a los 98 del STI y una relación señal a ruido media.

Por último, existe una correspondencia entre el %ALCons y el STI/RASTI [Figura 2.4]. A continuación se muestra la correspondencia entre los valores de estos parámetros y la inteligibilidad percibida [Tabla 2.2].

%ALCons	STI / RASTI	Valoración subjetiva
1,4 % – 0 %	0,88 – 1	Excelente
4,8 % – 1,6 %	0,66 – 0,86	Buena
11,4 % – 5,3 %	0,50 – 0,64	Aceptable
24,2 % – 12 %	0,36 – 0,49	Pobre
46,5 % – 27 %	0,24 – 0,34	Mala

Tabla 2.2. Correspondencia entre parámetros e inteligibilidad percibida.

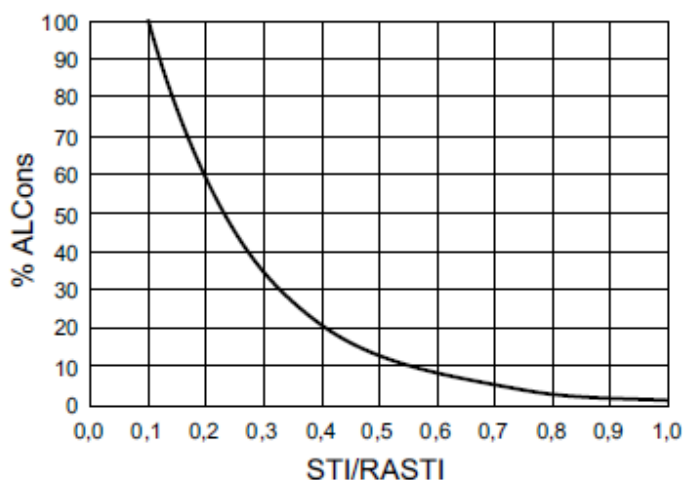


Figura 2.4. Correspondencia entre %ALCons y STI/RASTI.

2.1.7. Fuerza Sonora (G)

La Fuerza Sonora es un parámetro que sirve para determinar la amplificación que produce el recinto sobre el mensaje oral. Esa amplificación es debida a las reflexiones que llegan al punto donde se mide, aumentando el nivel de presión que el espectador recibe.

La Fuerza Sonora se expresa en decibelios y su cálculo es un cociente energético entre el nivel de presión recibida y el nivel de presión que se recibiría de esa fuente sonora a una distancia de 10 m en campo libre. Por tanto, valores de Fuerza Sonora positivos indican que el nivel que se recibe es superior al que se recibiría a una distancia de 10 m en campo libre. Sin embargo, lo habitual es que se produzca una amplificación superior a 3 dB.

La medición de este parámetro ayuda además a comprobar la uniformidad en cuanto a nivel dentro del recinto. Es preferible que el nivel de presión recibida sea lo más uniforme posible.

2.2. Recintos dedicados a la Música

Las salas dedicadas a la música y sus cualidades se diferencian significativamente de las salas dedicadas a la palabra. Mientras que en las salas para la palabra la inteligibilidad del mensaje era un requisito indispensable, en las salas para la música se juega con el hecho de que una sala más viva y menos seca es normalmente más confortable durante la escucha percibida. Además de intentar evitar los defectos acústicos ya conocidos (ecos, focalizaciones del sonido, zonas muertas, falsa localización de la fuente sonora...) se pretenderá conseguir una buena impresión espacial subjetiva del recinto, que haya riqueza en el sonido en cuanto a graves y agudos y conseguir un nivel reverberante mayor en el recinto, usando materiales poco absorbentes desde el punto de vista acústico.

El estudio de las salas dedicadas a la música es el más complicado, debido a la gran cantidad de parámetros (tanto objetivos como subjetivos) que se han definido para este tipo de espacios y la necesidad de que el recinto sea óptimo para el tipo de música que se va a escuchar en el mismo, dado que el rango de frecuencias implicadas será distinto, siendo la orquesta sinfónica la que comprende mayor rango, dado el gran abanico de instrumentos diferentes de los que se compone.

2.2.1. Tiempo de Reverberación (RT)

El tiempo de reverberación se define de igual manera que en las salas para palabra. La diferencia radica que para un buen confort acústico en la escucha de la música el tiempo de reverberación debe ser sustancialmente mayor. Como la mayor parte de los parámetros de este tipo de salas, el valor óptimo dependerá del tipo de música que se va a interpretar en la sala. La [Tabla 2.3] muestra los valores recomendados del RT_{mid} , el promedio del tiempo de reverberación en las bandas de octava centradas en 500 Hz y 1 kHz.

Tipo de música	$RT_{mid}(s)$
Música sinfónica	1,8 – 2,0
Música barroca y clásica	1,6 – 1,8
Música de cámara	1,3 – 1,7
Ópera	1,2 – 1,5

Tabla 2.3. Valores recomendados del RT en función del tipo de música interpretado (Valores para recintos ocupados).

Las salas para la interpretación de óperas deberán ser menos reverberantes (dada la importante componente vocal) que las salas dedicadas únicamente para la interpretación de piezas instrumentales, especialmente con orquestas sinfónicas, que alcanzan los tiempos de reverberación más elevados.

2.2.2. Early Decay Time (EDT)

El EDT está muy relacionado con el tiempo de reverberación. Si bien el tiempo de reverberación cuantía el tiempo necesario para que el nivel de presión sonora decaiga 60 dB, el EDT se define como 6 veces el tiempo necesario para conseguir una caída de presión de 10 dB.

Como cabe esperar, en una sala con una difusión del sonido uniforme, la caída vista en un ecograma será muy lineal, y por tanto los valores del RT y del EDT estarán muy próximos entre sí. Por tanto, una sala con buena difusión deberá cumplir esta igualdad, lo que supondrá que no se tiene una curva de decrecimiento con varias pendientes.

La importancia del EDT radica en que proporciona un valor objetivo de la viveza de la sala más cercano a la realidad que el tiempo de reverberación. En una sala con RT altos pero un EDT bajo,

el oyente tendrá la impresión de que la sala es apagada, al contrario de lo que se pensaría con el estudio del RT.

2.2.3. Fuerza Sonora y Ruido de Fondo

El concepto es el mismo que en las salas dedicadas al mensaje oral. La **Fuerza Sonora** es una magnitud que mide la amplificación del sonido que produce la sala. Esta amplificación es debida a las primeras reflexiones y la distancia a la fuente sonora. Se pretende por tanto, que el grado de amplificación sea suficiente y el recinto cuente con la mayor uniformidad posible.

El parámetro se define exactamente de la misma forma: un cociente energético entre el nivel de presión recibida y el nivel que se recibiría a 10 m en campo libre usando la misma fuente como excitación acústica.

El **Ruido de Fondo** también debe ser bajo en este tipo de salas para que la escucha no se vea contaminada por ningún ruido ajeno al interpretado en el recinto. Las *curvas NC* también son una referencia en la caracterización de este tipo de recintos.

2.2.4. Claridad de la Música (C_{80})

La Claridad Musical es un parámetro indicador de la calidad del recinto para la música, dado que define el grado de separación entre los sonidos individuales que integran cualquier composición musical. Su cálculo es análogo al de la Claridad de la Voz (C_{50}), con un cociente energético entre la energía recibida en los primeros 80 ms y la energía posterior a dicho límite temporal [Ecuación 2.6].

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{0,08} p^2(t) dt}{\int_{0,08}^{\infty} p^2(t) dt} [dB] \quad (2.6)$$

Según aumenta el valor de este parámetro, se consigue una mayor claridad. Esto es debido a que la energía recibida de las primeras reflexiones contribuye a aumentar la claridad de la escucha, dado que son integradas junto con el sonido directo. Sin embargo, en el caso de la música, se integran todas aquellas reflexiones que llegan en los primeros 80 ms, al contrario que en la palabra, que el límite temporal era de 50 ms. Ésta es la única diferencia entre el cálculo de la Claridad de la Voz y la Claridad Musical.

La Claridad Musical también se calcula en las bandas de frecuencia comprendidas entre 125 Hz y 4 kHz y, si se desea, se puede calcular un valor único de este parámetro que tiene en cuenta las bandas de frecuencia de 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz, denominado **Music Average**.

2.2.5. Bass Ratio (BR) y Brillo (Br)

Ambos parámetros se calculan a partir de los tiempos de reverberación. **Bass Ratio** cuantifica la calidez acústica, entendida como la riqueza y presencia de graves de la música en la sala, por medio de un cociente entre los tiempos de reverberación de frecuencias bajas y los tiempos de reverberación de frecuencias medias [Ecuación 2.7].

$$BR = \frac{RT_{125 \text{ Hz}} + RT_{250 \text{ Hz}}}{RT_{500 \text{ Hz}} + RT_{1 \text{ kHz}}} \quad (2.7)$$

De un modo similar, se puede operar sobre los tiempos de reverberación de frecuencias altas y frecuencias medias, obteniendo el **Brillo**, parámetro que cuantifica la propiedad que su propio nombre indica, entendida como la riqueza en armónicos y la claridad de agudos en la música escuchada [Ecuación 2.8].

$$Br = \frac{RT_{2 \text{ kHz}} + RT_{4 \text{ kHz}}}{RT_{500 \text{ Hz}} + RT_{1 \text{ kHz}}} \quad (2.8)$$

2.2.6. Energía Lateral Precoz (J_{LF})

La impresión subjetiva de que la orquesta es mucho mayor de lo que realmente es, está relacionada con las primeras reflexiones que inciden lateralmente sobre el oyente. Esta impresión de estar escuchando una orquesta de grandes dimensiones, provoca a su vez que la valoración de la sala mejore, aparentando una mayor calidad acústica.

La Energía Lateral Precoz, cuantifica esta propiedad, conocida como **Amplitud Aparente de la Fuente Sonora (ASW)** y, si bien en todos los parámetros anteriores era necesario utilizar un micrófono omnidireccional para su medida, en este caso será necesario un micrófono bidireccional [Figura 2.5] para poder diferenciar las reflexiones laterales de aquellas que lleguen frontalmente al oyente.

El cálculo de la Energía Lateral Precoz es, por tanto, un cociente energético entre la energía proveniente de las reflexiones laterales y la energía total recibida (con el uso en este caso de un micrófono omnidireccional) en los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo, las primeras reflexiones [Ecuación 2.9].

$$J_{LF} = \frac{\int_{0,005}^{0,08} p_L^2(t) dt}{\int_0^{0,08} p^2(t) dt} \quad (2.9)$$

donde $p_L(t)$ es la presión acústica instantánea en la respuesta impulsiva medida con un micrófono bidireccional y $p(t)$ es la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva medida.

Si se quiere dar un único valor en frecuencia, se puede realizar un promedio con los valores de la Energía Lateral Precoz obtenida en las bandas de octava de frecuencia central comprendidas entre

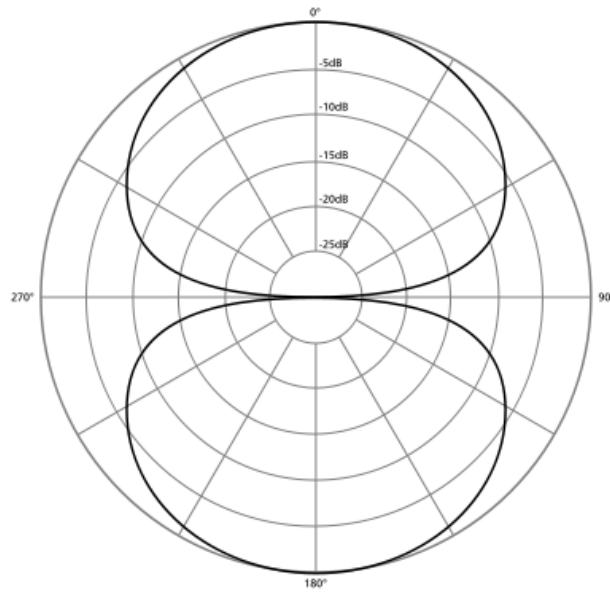


Figura 2.5. Diagrama de directividad de un micrófono bidireccional.

125 Hz y 1 kHz. Un mayor valor de este parámetro equivale a una Amplitud Aparente de la Fuente Sonora mayor.

2.2.7. Correlación Cruzada Interaural Precoz ($IACC_E$)

La medida de cualquier tipo de Correlación Cruzada Interaural requiere del conocimiento de la señal captada por dos micrófonos situados en el interior del canal auditivo de una cabeza artificial. Esto se debe a que esta familia de parámetros se basa en determinar la correlación existente entre la onda recibida en ambos oídos en el mismo instante de tiempo, siendo la correlación 0 cuando las señales recibidas son aleatorias e independientes y 1 cuando son exactamente la misma señal.

Para la medición de este parámetro se evalúa la correlación de ambas señales en los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo en las bandas de octava comprendidas entre las frecuencias centrales de 125 Hz y 4 kHz. Sin embargo, las bandas de octava más representativas de este parámetro son las centradas en 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz, por lo que se puede calcular el promedio de estos tres valores para dar un único resultado, $IACC_{E3}$.

Para una mayor comprensión de este parámetro se suele usar el valor $(1 - IACC_{E3})$ ya que un aumento en él equivale a que las señales medidas tienen mayor grado de disimilitud y, por tanto, existe una mayor Amplitud Aparente de la Fuente Sonora.

Aunque se ha comprobado que el uso de la Correlación Cruzada Interaural Precoz es más preciso a la hora de cuantificar la Amplitud Aparente de la Fuente Sonora, no ha sido aún aceptado

de manera uniforme. Además, no existe un número elevado de salas donde se haya medido este parámetro en comparación con la Energía Lateral Precoz.

2.2.8. Energía Lateral Tardía (L_J)

La Energía Lateral Tardía sirve para dar un valor objetivo a la sensación de estar envuelto por el sonido. Esto se conoce como **LEV (Listener Envelopment)**. Junto con la Amplitud Aparente de la Fuente Sonora, constituyen las propiedades espaciales del campo acústico. Al igual que sucede con ASW, mayor LEV supondrá una mejor valoración de la sala por parte de un oyente.

El cálculo de la Energía Lateral Tardía se realiza en las bandas de octava de frecuencia central comprendidas entre 125 Hz y 4 kHz y consiste en un cociente energético entre la energía recibida tras los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo (medida con un micrófono bidireccional) y la energía total medida de la respuesta al impulso en campo libre a una distancia de 10 m (medida con un micrófono omnidireccional) [Ecuación 2.10].

$$L_J = 10 \log \frac{\int_{0,08}^{\infty} p_L^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} [dB] \quad (2.10)$$

donde $p_L(t)$ es la presión acústica instantánea en la respuesta impulsiva medida con un micrófono bidireccional y $p_{10}(t)$ es la presión acústica instantánea en la respuesta impulsiva medida con un micrófono omnidireccional a una distancia de 10 m en campo libre.

El uso de las reflexiones laterales tardías es debido a que todas las reflexiones recibidas tras los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo, son separadas de él, tanto temporalmente como espacialmente, por lo que llegan al oyente desde direcciones diferentes al sonido directo, creando la sensación de envolvente acústica.

Es posible el cálculo de un único valor de la Energía Lateral Tardía, como un promedio energético del resultado obtenido en las bandas de octava de frecuencia central comprendidas entre 125 Hz y 1 kHz [Ecuación 2.11]. A mayor valor de este parámetro, mayor sensación de envolvente será percibida en la sala.

$$L_{J,average} = 10 \log \left(\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 10^{L_{Ji}/10} \right) [dB] \quad (2.11)$$

2.2.9. Correlación Cruzada Interaural Tardía ($IACC_L$)

Este parámetro cuantifica el grado de disimilitud entre dos señales captadas con una cabeza artificial en ambos oídos a partir de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo. También se calcula entre las bandas de octava de frecuencia central entre 125 Hz y 4 kHz y puede obtenerse un valor único en frecuencia ($IACC_{L3}$), con el promedio de los valores obtenidos en las bandas de

500 Hz, 1 kHz y 2 kHz . Del mismo modo, suele usarse la expresión $(1 - IACC_{L3})$, dado que un aumento de este valor implica una mayor sensación de envolvente del campo sonoro.

Sin embargo, y aunque su uso todavía no ha sido unificado, hay que destacar que su fiabilidad es baja. Un valor pequeño en la expresión $(1 - IACC_{L3})$ implica un grado de difusión tardío pobre, con poca sensación de envolvente sonora. Un valor elevado de la expresión no asegura una sensación elevada de envolvente.

2.2.10. Soporte Precoz y Tardío

El soporte, al contrario que todos los parámetros anteriores que se definen sobre el área de audiencia, es una magnitud que se mide sobre el escenario, con la fuente y micrófono omnidireccional próximos entre sí.

El **Soporte Precoz** está relacionado con la facilidad de audición para el propio músico, tanto de escucharse a sí mismo como de escuchar al resto de la orquesta. Su cálculo es un cociente energético entre la energía recibida en el primer 0,1 s (sin contar el sonido directo y las reflexiones cercanas) y el sonido directo junto con la reflexión cercana del suelo.

El **Soporte Tardío** informa sobre la reverberación de la sala percibida por el músico, definida como un cociente energético entre la energía recibida tras el primer 0,1 s, frente a la energía del sonido directo y la primera reflexión del suelo.

Ambos parámetros son medidos con una distancia de 1 m entre fuente y micrófono y con la sala vacía, pero el escenario con los atriles y elementos necesarios de la orquesta, dejando un espacio de 2 m libre de elementos alrededor del micrófono.

2.3. Recintos Multifuncionales

Los recintos multifuncionales son aquéllos cuya acústica está diseñada para adaptarse a cualquiera que sea la actividad que se realice en ellos. Este tipo de recintos puede conseguir este objetivo por medio de tres formas diferentes.

Una opción puede ser que el recinto se haya diseñado a medio camino entre un recinto para la palabra y un recinto para la música. De esta forma, la sala no se optimizará para ningún tipo de uso, pero será una solución aceptable en cualquier tipo de espectáculo.

Como ejemplo, se puede diseñar un recinto para que tenga un tiempo de reverberación en torno a 1,5 s. De esta forma, la sala no tendrá una acústica óptima para acoger conferencias ni conciertos de grandes orquestas, pero podrá desempeñar dicha función de forma razonable en ambos casos.

Otra línea de trabajo es la utilización de equipo electroacústico para adaptar la sala a su propósito. De esta forma, se puede diseñar un recinto para que su tiempo de reverberación sea el mínimo deseable y, por medio de un sistema electroacústico, introducir reverberación artificial para adaptar la sala a conciertos u otras necesidades. El funcionamiento de esta solución es simple. Se distribuyen una serie de micrófonos por el recinto, que captan el sonido existente en la sala. Esta señal se procesa y amplifica y se manda a un conjunto de altavoces también distribuidos a lo largo de la sala, con lo que se consigue la reverberación artificial. Esta solución no suele utilizarse mucho, debido, sobre todo, a su falta de naturalidad.

La última solución para los recintos multifuncionales es adaptar el recinto a su uso mediante elementos físicos variables. Esto se puede conseguir de numerosas formas posibles. Algunas de las soluciones más frecuentes son la utilización de paneles móviles suspendidos del techo, el uso de cortinas para tapar paredes reflectantes, falsos techos móviles, etc. Dentro de este último gran bloque de soluciones podríamos encontrar casos muy comunes, como la instalación de una concha acústica en el escenario cuando va a tocar una orquesta, mejorando sobre todo las condiciones de escucha para los músicos, o la utilización de un foso de orquesta móvil, que pueda elevarse para aumentar la superficie útil del escenario cuando no se necesite la interpretación de músicos en él. De igual forma, la instalación de difusores suspendidos en el techo de auditorios, los cuales pueden moverse en función del tipo de orquesta o representación que se desarrolla.

Capítulo 3

Auditorio Padre Soler

El Auditorio Padre Soler está ubicado en la localidad madrileña de Leganés, dentro del Campus de la Escuela Politécnica de la Universidad Carlos III de Madrid.



Figura 3.1. *Vista exterior del Auditorio Padre Soler.*

Es uno de los mayores espacios escénicos de toda la Comunidad de Madrid, contando con un aforo de más de 1000 personas distribuidas en 26 filas de asientos, con una diferencia de altura de 11 m entre la altura de la primera y última fila. La primera fila está a una distancia de 2,4 m de la terminación del foso de orquesta, y la última, a una distancia aproximada de 29 m. El volumen total del recinto se aproxima a los 19000 m³. En su altura máxima, el torreón de Tramoya alcanza los 28 m sobre la altura del piso del escenario.

En cuanto a los principales materiales utilizados en su interior, en toda la zona de butacas se puede observar la utilización de la madera de haya para el suelo, paredes laterales y pared posterior. El pladur es utilizado para el techo del auditorio.

Dentro de este gran recinto se realizan todo tipo de eventos y espectáculos, siendo habitual tanto representaciones teatrales como conciertos de todo tipo. Como curiosidad, cabe destacar que el Auditorio acogió uno de los mayores debates electorales el pasado 27 de Noviembre de 2015.



Figura 3.2. Auditorio preparado para acoger una conferencia.

Este grado de versatilidad es debido a la disposición de elementos que permiten modificar la acústica del mismo. El auditorio cuenta con un escenario de gran amplitud (ligeramente mayor de 18 m) con un foso escénico que puede ser elevado o bajado a conveniencia. El techo de proscenio también puede ser elevado o bajado, cambiando la acústica del auditorio. Por último, las paredes laterales y posterior del auditorio están inclinadas, favoreciendo la reflexión del sonido uniformemente sobre todo el área de audiencia.

El recinto cuenta con toda la instalación de audio propia de un recinto de sus dimensiones, con un sistema de refuerzo sonoro, monitorización en el escenario y mesas de mezclas.

Una vez vistos los diferentes elementos del auditorio, es necesario definir la configuración bajo la cuál se ha realizado el modelo virtual y las distintas mediciones *in situ*. Se ha estudiado el recinto con el auditorio vacío, foso de orquesta subido a la misma altura del escenario, cámara negra montada sobre el escenario, telón cortafuegos levantado y techo de proscenio totalmente subido.

Por simplicidad, en lo sucesivo de trabajo, se definirán distintas áreas de audiencia nombradas con letras [Figura 3.4] referenciando a cada zona de butacas separadas por pasillos centrales y laterales.

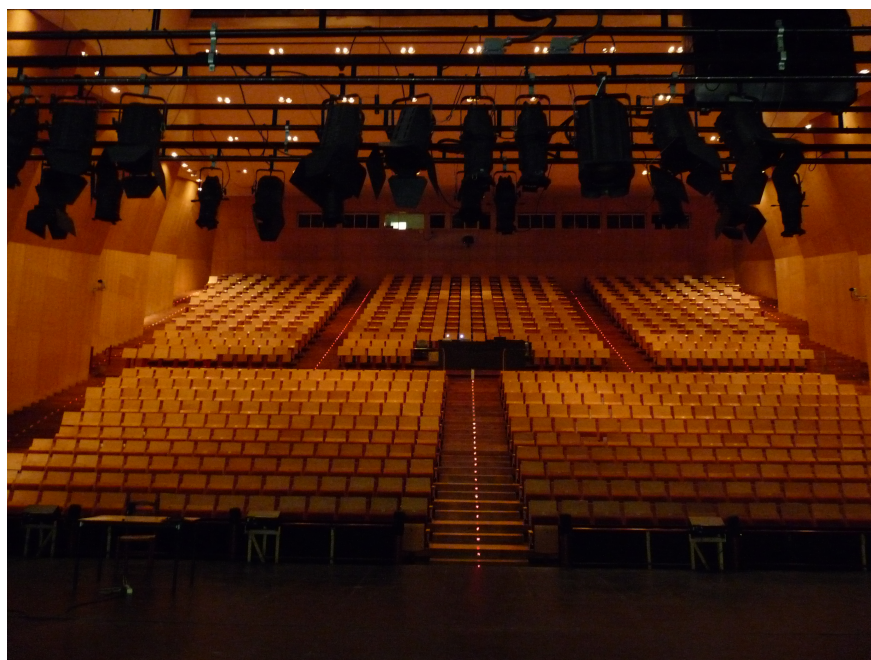


Figura 3.3. Zona de audiencia vista desde el escenario.

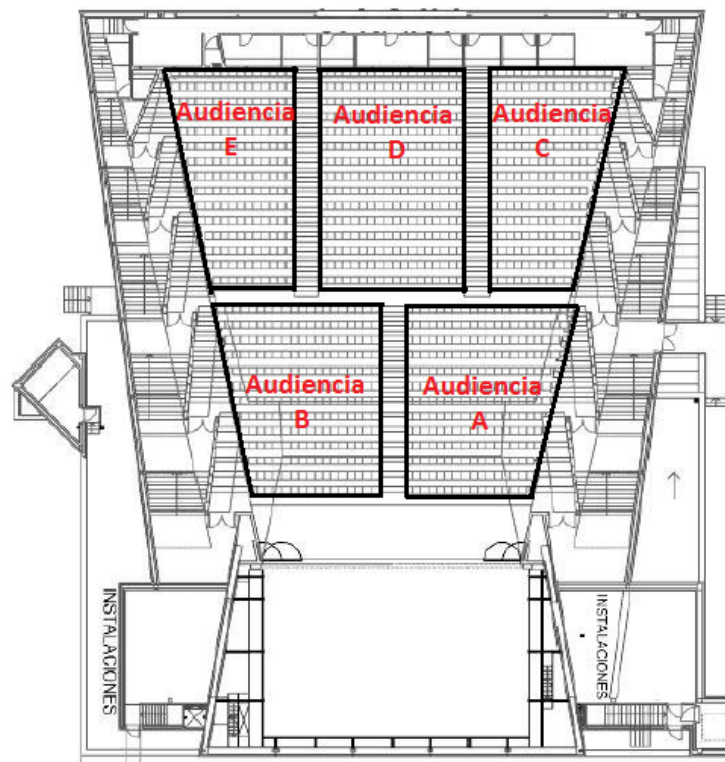


Figura 3.4. Nomenclatura de las distintas zonas de butacas.

Capítulo 4

Creación del Modelo 3D

La segunda gran parte del trabajo realizado es la simulación del auditorio mediante el software **EASE (Enhanced Acoustic Simulator for Engineers)** (Versión 4.3). Mediante esta simulación podemos obtener propiedades acústicas que no se han podido medir en el recinto, aunque todos los parámetros acústicos que el software calcula podrían haber sido medidos *in situ*.

Para que la simulación obtenida mediante el modelo virtual represente lo más fielmente posible la realidad y los datos obtenidos se correspondan con los que se obtendrían mediante una medición *in situ*, es necesario que una vez construido el modelo se lleve a cabo un proceso de ajuste. Este ajuste ha consistido en modificar los diferentes materiales insertados en el modelo virtual, de tal forma que los tiempos de reverberación medidos *in situ* para el ajuste del modelo, según el método impulsivo, concuerden con los tiempos de reverberación simulados por el software en el mismo punto. El proceso de ajuste utilizado en este proyecto se explicará con más detalle en el [Capítulo 6].

El uso de software acústico está respaldado por la posibilidad de calcular diversas propiedades acústicas de un recinto antes de ser construido y, por tanto, poder comprobar que va a ser idóneo para el propósito para el que se ha diseñado. Si el recinto ya está construido, una medición *in situ* puede aportarnos resultados más fiables de las propiedades del mismo. Sin embargo, contar con el modelo virtual nos permite, entre otras cosas, poder realizar procesos de auralización, permitiendo evaluar cómo sonaría una obra musical sin necesidad de estar en el auditorio. Además, también permite obtener datos sobre el funcionamiento acústico de cualquier modificación prevista. Por último, vale la pena citar que se han realizado mediciones en una configuración de escenario y, una vez ajustado el modelo virtual para esta configuración, tiene sentido pensar que mediante simulación podremos obtener resultados fiables de otras configuraciones del auditorio.

4.1. Construcción mediante Software del Auditorio

EASE se basa en una simulación del campo acústico dentro del recinto modelado para obtener los resultados que veremos más adelante en este capítulo. Por tanto, para dicha simulación hay dos

aspectos totalmente imprescindibles.

El primero de ellos es la información geométrica del recinto. Para ello es necesario dibujar el recinto, con mayor o menor detalle, dado que grandes superficies serán relevantes en el cálculo de propiedades en baja frecuencia y superficies pequeñas afectarán mayoritariamente al campo sonoro en alta frecuencia. Ésto es debido al fenómeno ondulatorio de la reflexión. Si una onda incide sobre un obstáculo de dimensiones mayores que su longitud de onda, la onda se reflejará. En el caso de que la longitud de onda sea mayor que el obstáculo, la onda lo rodeará, no afectando éste al campo sonoro (fenómeno conocido como difracción acústica).

La segunda gran parte de la construcción del recinto es proporcionar la información de los materiales expuestos al campo. Durante la creación del recinto es necesario definir qué caras de cada superficie están expuestas al campo y cuáles no. En función del material de recubrimiento de las caras expuestas y sus coeficientes de absorción en función de la frecuencia, será más o menos importante el fenómeno de reflexión o absorción (la energía se disipa en forma de calor) de las ondas sonoras incidentes al material. Como regla general, superficies muy porosas serán muy absorbentes y superficies lisas, más compactas, tendrán poca absorción, reflejando gran parte de la energía de la onda. También es de importancia el coeficiente de scattering. Este coeficiente modula las desviaciones en la reflexión especular de las ondas de presión debido a irregularidades en el material contra el que impactan.

Volviendo al mínimo nivel de detalle en la geometría del modelo, es importante reflejar todas las superficies susceptibles de afectar al campo sonoro por medio de los fenómenos ya vistos. En lo que al presente proyecto respecta, el mínimo nivel de detalle obtenido lo proporcionan los escalones de la zona de butacas, con un nivel de detalle de aproximadamente 16 cm, aunque en el escenario y torre de Tramoya no se ha podido llegar a ese nivel de detalle. En el caso del auditorio estudiado, debido a que la mayoría de superficies del recinto cuentan con un área considerable, el hecho de no modelar las superficies menores de 16 cm no es crítico. No obstante, el valor del coeficiente de scattering aportado a las superficies del modelo también ayuda a minimizar el error cometido, dado que modela las irregularidades en los diferentes materiales.

Mediante la información de la geometría del recinto y la disposición a lo largo de él de los materiales y sus propiedades, se puede simular el campo acústico en el interior del mismo y, con ello, empezar a obtener indicadores de la calidad acústica del mismo.

4.1.1. Creación de la Geometría de la Sala

El primer paso tras crear un nuevo proyecto en EASE es la definición del recinto sobre el que se va a trabajar. Utilizando el módulo “Room Edit”, podemos realizar cambios a algunos de los modelos de recinto incluidos por defecto en EASE o empezar a crear un nuevo modelo desde cero.

En la realización de este proyecto, dada la desimilitud del Auditorio con los modelos por defecto, se ha escogido la segunda opción para crear el recinto.

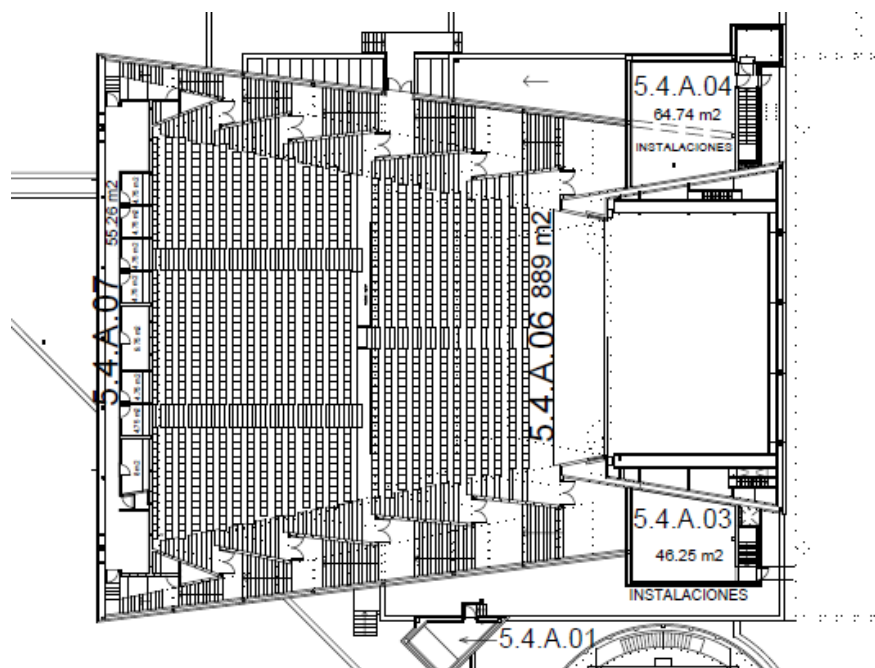


Figura 4.1. Plano de Planta del Auditorio.

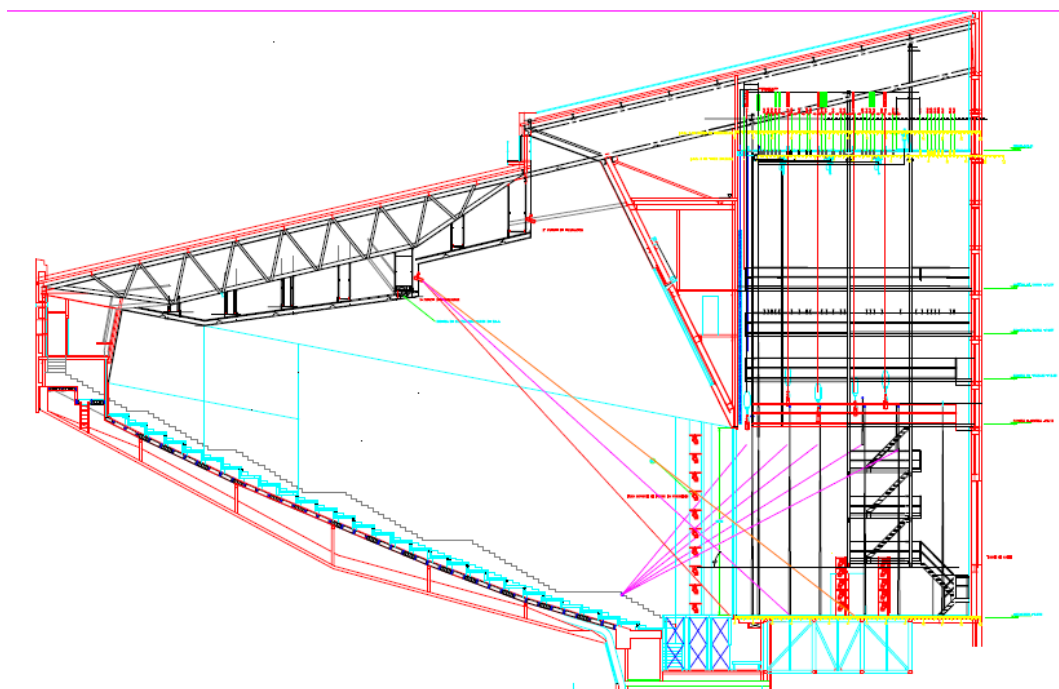


Figura 4.2. Plano de Sección del Auditorio.

EASE proporciona un entorno de creación de recintos intuitivo y sencillo, a la par que laborioso. Los recintos están formados por caras (Faces), recubiertas por una o ambas caras de un material expuesto al campo sonoro. Las caras unen una serie de puntos (Vertex) que hay que definir previamente, en un sistema de coordenadas (X, Y, Z). Además, consta de una opción “*Room Symmetric*”, mediante la cuál se puede definir un eje y punto de simetría para poder crear fácilmente las partes simétricas del recinto.

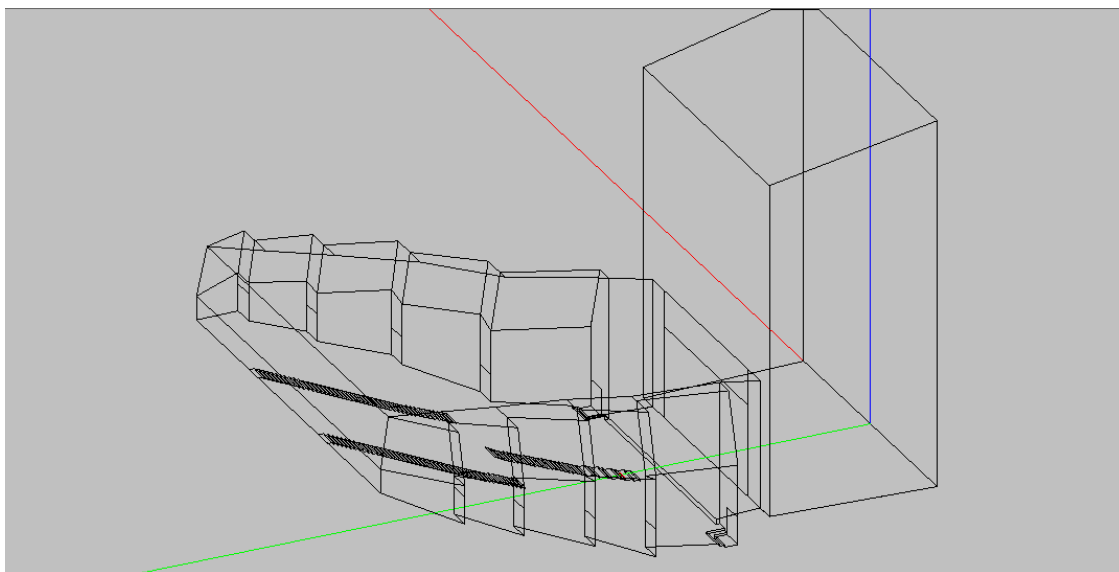


Figura 4.3. Proceso de creación del modelo.

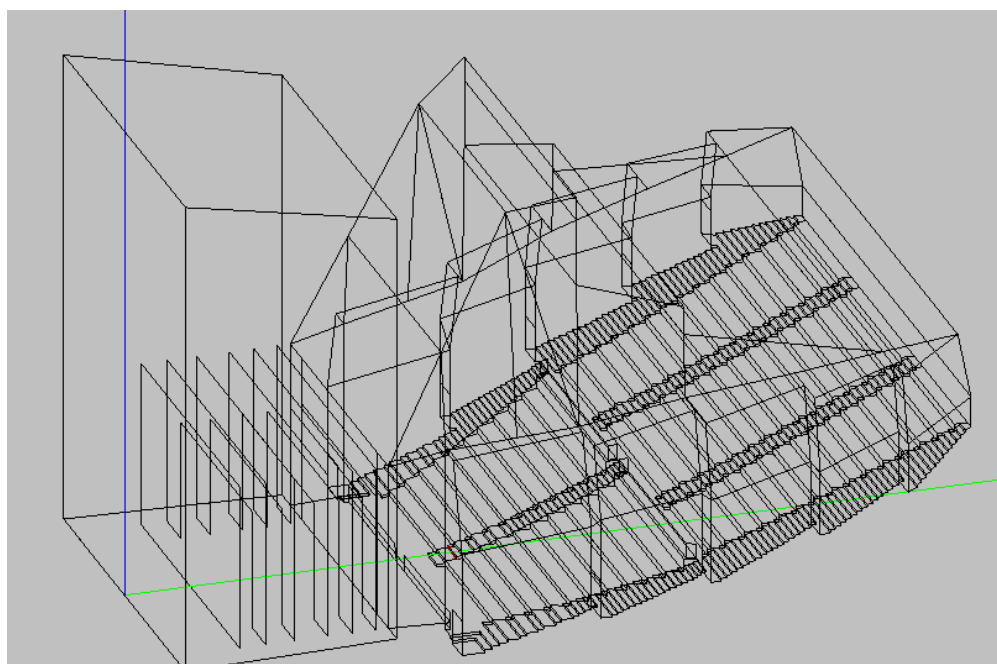


Figura 4.4. Modelo finalizado en vista de perspectiva.

En la creación del recinto se ha utilizado el Eje X para delimitar las distancias laterales, el Eje Y para las distancias longitudinales (aumentando según se está en una fila de la audiencia más alejada del escenario) y el Eje Z para la altura de los diversos elementos. Dada la simetría de la sala estudiada, se ha fijado el eje de simetría en el Eje X.

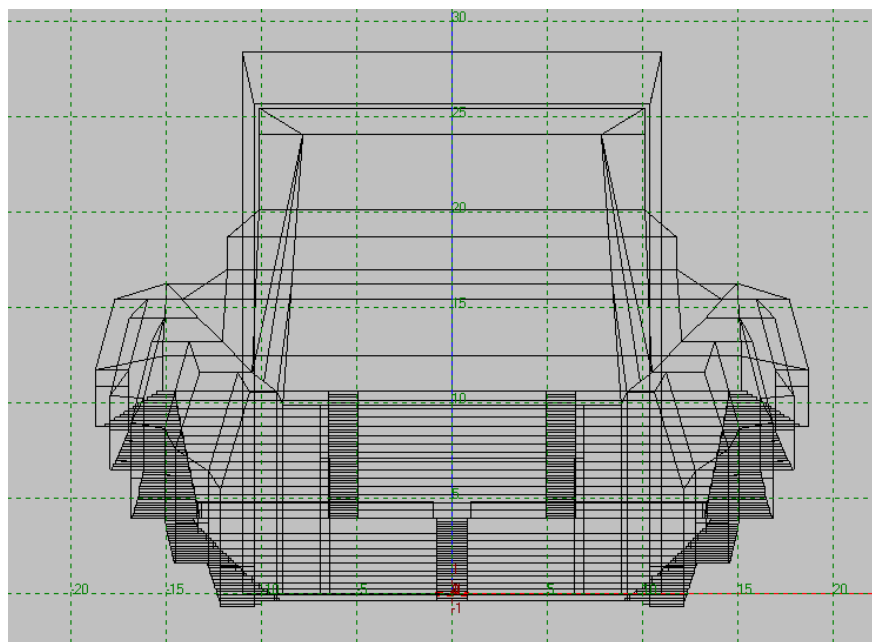


Figura 4.5. Modelo finalizado en vista de alzado.

Las dimensiones del auditorio han sido tomadas por medio de un metro láser *in situ* y para aquellas superficies que no se han podido medir (gran distancia, elementos inclinados, ocultas...) se han usado los datos existentes en planos con cotas proporcionados por los el servicio de Mantenimiento y Obras de la Universidad, por lo que el error cometido en la creación del recinto es mínimo. El proceso seguido para la creación del Auditorio ha sido simple: definición de los vértices de las superficies en las coordenadas X, Y, Z, la unión de dichos vértices mediante líneas (sin ningún efecto de cómputo, para tener una visión espacial de la superficie creada) y finalmente la creación de la superficie con los vértices creados (sin cambiar el material por defecto asignado a la superficie, algo que se ha realizado una vez establecida toda la geometría del recinto). Además, primero se creó una versión con poco grado de detalle para posteriormente ir introduciendo los elementos de menor superficie.

El proceso de creación empezó por el escenario, pasando a la inclusión de las paredes laterales inclinadas de la zona de audiencia, junto con la pared del fondo del Auditorio y los escalones de los pasillos centrales [Figura 4.3]. Como se puede ver en dicha figura, el origen de coordenadas está situado en el extremo del escenario, con el eje pintado en rojo como Eje X, Eje Y en verde y Eje Z en azul.

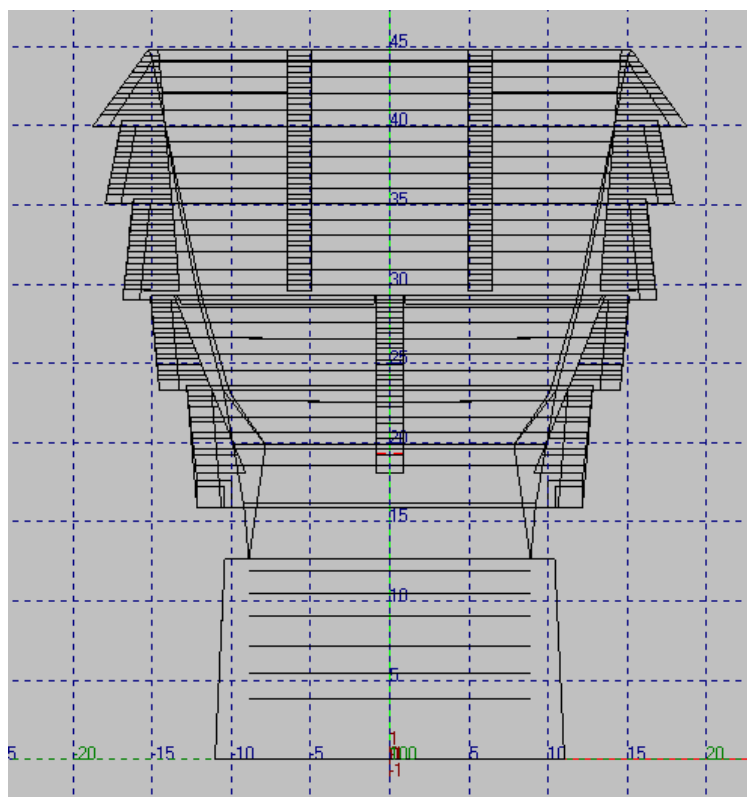


Figura 4.6. Modelo finalizado en vista de planta.

Se finalizó una primera representación de las dimensiones del recinto añadiendo el techo situado sobre la zona de audiencia. Detalles posteriores fueron la cámara negra en el escenario, los escalones de los pasillos laterales, los niveles de la zona de las butacas y algún elemento extra [Figura 4.4]. En las vistas de alzado [Figura 4.5], planta [Figura 4.6] y perfil [Figura 4.7] podemos observar los distintos detalles del modelo y sus dimensiones expresadas en metros.

El modelo, una vez finalizado, cuenta con un total de 1106 caras, formadas por la unión mediante planos de 1844 puntos en el sistema de coordenadas en 3 ejes.

Cámara Negra

Como ya se ha comentado en el [Capítulo 3], durante la medición el Auditorio ha tenido montada una cámara negra, el conjunto de cortinajes (telón de fondo, bambalinas y patas) que permiten que el espectador no distraiga su atención de lo que hay en el escenario, al poder preparar la entrada de personas y elementos en el mismo y a su libre movimiento por dichas zonas sin que el espectador pueda ver los preparativos. Como función extra, la cámara negra debe absorber la luz proveniente de las zonas que no son parte de la función, como los camerinos.

La cámara negra se debe montar tal que en la primera fila de asientos y, en el extremo más alejado del centro del escenario, un espectador sea incapaz de ver las zonas ocultas por las patas de

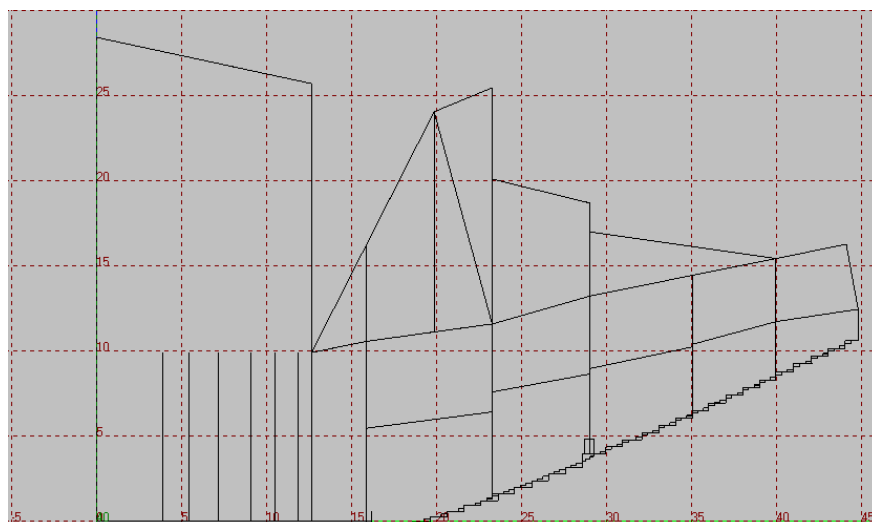


Figura 4.7. Modelo finalizado en vista de perfil.

la cámara negra y las bambalinas [Figura 4.8]. Si se cumple esta condición, que es la más restrictiva, ningún espectador podrá ver las zonas ocultas del escenario y la cámara negra estará cumpliendo su función.

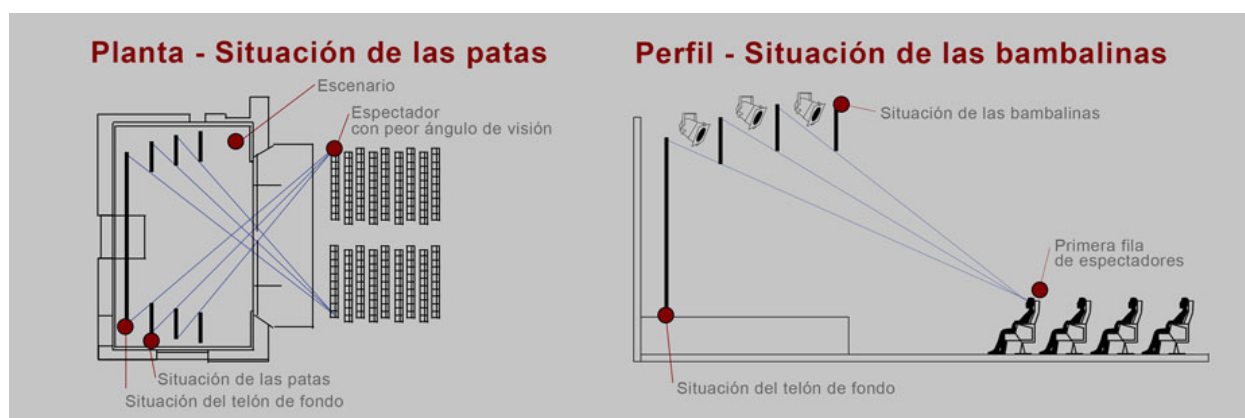


Figura 4.8. Colocación de los elementos de la cámara negra.

EASE proporciona una herramienta, **Item View**, para poder observar el recinto desde un elemento concreto. Usando esta vista desde el extremo del último asiento de la primera fila, podemos comprobar que, efectivamente, la cámara negra esconde diversas zonas del escenario [Figura 4.9]. En la figura se ha sombreado en distintos tonos de gris el conjunto de elementos de la cámara negra, oscureciéndose según la distancia de los elementos al espectador, para una correcta visión espacial.

Vista Arquitectónica

EASE proporciona una vista alternativa de visualización del recinto mediante el **módulo EASE VISION**. En esta vista se observan las distintas superficies del recinto, sombreadas según

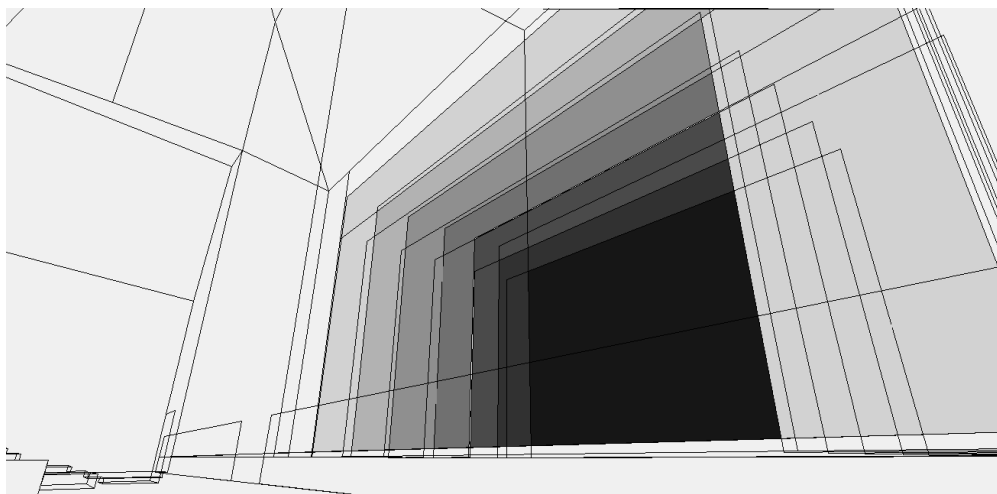


Figura 4.9. Vista de los elementos de la cámara negra desde el último asiento de la primera fila de espectadores.

su inclinación [Figura 4.10]. En la figura, en gris, superficies verticales y en blanco, superficies horizontales

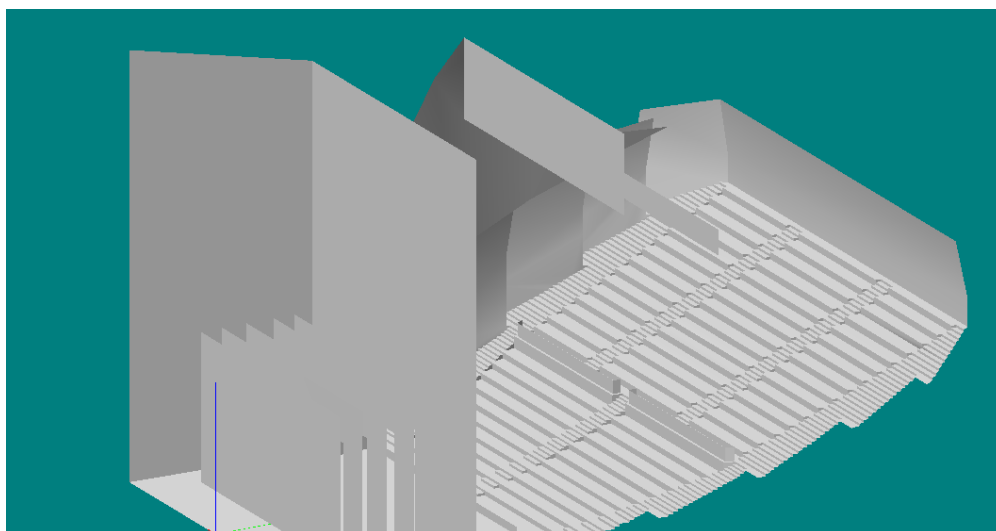


Figura 4.10. Vista arquitectónica del recinto.

También se proporcionan herramientas avanzadas de visualización del recinto. Es posible ver el recinto asignando colores a las superficies, patrones concretos a cada una de ellas, vista desde el interior del recinto e incluso una representación usando uno o varios focos luminosos distribuidos en posiciones predefinidas.

En la simulación con el foco luminoso, EASE utiliza el cálculo de las primeras reflexiones de la onda para conseguir una representación de luces y sombras del recinto. De esta forma, aquellos elementos más expuestos a la radiación directa serán blancos y, a medida que nos alejemos del foco

luminoso o no se produzcan muchas reflexiones sobre el área, los elementos tenderán a oscurecerse.

Utilizando un foco luminoso en una zona intermedia del escenario y dirigiendo la mirada hacia el área de audiencia [Figura 4.11], podemos analizar el resultado obtenido. Como observamos, es normal que la zona de audiencia cercana esté más iluminada dado que se encuentra más cerca del foco y que a medida que nos alejamos la luz se desvanezca. Sin embargo, podemos observar una correcta función de la geometría del auditorio, dado que se observa un nivel de luminosidad muy constante en todo el área de audiencia, independientemente de la distancia al escenario. Este fenómeno viene producido presumiblemente por las primeras reflexiones de las ondas en las paredes laterales del recinto, la pared posterior y el techo de proscenio, distribuyendo la luz uniformemente sobre las filas de espectadores.

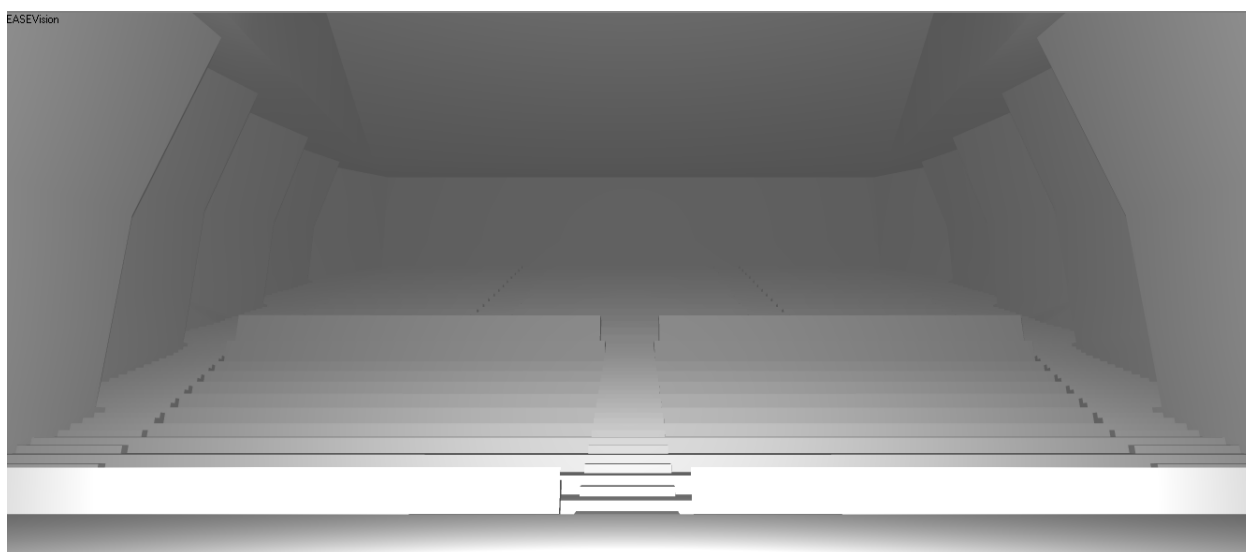


Figura 4.11. Vista de la audiencia en luces y sombras usando un foco luminoso omnidireccional en la parte central del escenario.

Posteriormente estudiaremos el comportamiento de la uniformidad del campo acústico en el recinto simulado, pero este primer paso observando el comportamiento con el foco luminoso es buena señal de que el recinto cumple esta importante propiedad, aunque de este modo no estamos teniendo en cuenta los materiales que recubren las superficies de la sala, y sus coeficientes de absorción.

Capítulo 5

Medición en el Recinto

La medición *in situ* en el auditorio ha tenido dos grandes propósitos. Uno de ellos ha sido proporcionar los datos suficientes para el correcto ajuste del modelo de EASE. El otro, caracterizar acústicamente el recinto para obtener sus principales propiedades. Ambas medidas, han sido realizadas conforme a lo establecido en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2009 (Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos). Del mismo modo, el análisis de ambas mediciones se ha realizado en bandas de 1/3 de octava de frecuencia central comprendidas entre 100 Hz y 10 kHz. Aunque el equipo de medida permite un análisis mayor en frecuencia, no se han incluido dichas bandas por no estar contempladas en el software EASE y por no ser acústicamente relevantes al propósito de las mediciones.

En las dos mediciones se ha estudiado el recinto con la configuración expuesta en el [Capítulo 3].

5.1. Mediciones para el Ajuste del Modelo

Mediante estas mediciones se han obtenido datos del tiempo de reverberación medidos tanto en el escenario como en la zona de butacas del auditorio. Con estos datos se ha ajustado la simulación que proporciona EASE de tal forma que los tiempos de reverberación de cada punto medidos *in situ* concuerden con los tiempos de reverberación simulados por el software en el mismo punto.

5.1.1. Equipo usado en las Mediciones para el Ajuste del Modelo

El dispositivo usado para las diferentes mediciones ha sido un analizador sonoro clase 1, el sonómetro SOLO de la empresa 01dB [Figura 5.1]. Este sonómetro está especialmente diseñado para realizar mediciones acorde a las diferentes normativas de acústica. Por ello, su principal uso es para evaluar el ruido ambiental, ensayos de aislamiento acústico, medida de ruido en el puesto de trabajo, mediciones del tiempo de reverberación, etc. Además, el software que la empresa distribuye se focaliza en proporcionar herramientas eficaces para la obtención sencilla de los informes conforme a la normativa vigente.



Figura 5.1. Sonómetro usado en las medidas en el recinto con la pantalla antiviento.

Entre las funcionalidades interesantes para este proyecto, está la posibilidad de realizar un análisis en bandas de 1/1 y 1/3 de octava (desde 12.5 Hz a 20 kHz), posibilidad de calcular el tiempo de reverberación mediante los métodos de la fuente interrumpida y el método impulsivo y, como cabe de esperar, la posibilidad de medir un nivel continuo equivalente, que será útil para la medida del ruido de fondo.

El micrófono con el que este sonómetro captura los datos es un micrófono clase 1, prepolarizado, de campo libre y tamaño de 1/2 ". El diagrama polar de este micrófono es omnidireccional, con lo que presenta la misma sensibilidad en todas las direcciones del espacio. De este modo, no es necesario que el micrófono apunte en dirección a la fuente acústica y los resultados obtenidos serán independientes de la orientación del micrófono.

Como fuente de excitación del recinto se han usado globos de latex de diferente tamaño, que han sido explotados para producir un impulso acústico.

5.1.2. Puntos de Medición en el Recinto

Se ha medido el tiempo de reverberación en puntos tanto del escenario como de la zona de audiencia. Así, se tienen datos suficientes para proceder al ajuste del modelo, con la elección de los materiales adecuados desde el punto de vista de su coeficiente de absorción y scattering, tanto en la zona del escenario, como en la zona de butacas (un cambio en los materiales del escenario afectará de manera más significativa al tiempo de reverberación obtenido sobre éste que al tiempo de reverberación obtenido en la zona de butacas). De forma análoga, la fuente sonora (explosión

de globos) se ha desplazado por todo el recinto, obteniéndose medidas con la fuente cerca de las áreas de audiencia y con la fuente en el escenario.

En total se han realizado un total de 17 medidas con este método. Las posiciones de la fuente se distribuyen entre 3 posiciones en el escenario y 3 posiciones en los pasillos superiores de la zona de butacas. En cuanto a las posiciones de equipo de medida (a las que, por simplicidad, también llamaremos posiciones de micrófono), 3 de ellas están en el escenario y las 14 restantes en el área de audiencia.

En la [Figura 5.2] podemos observar las diferentes posiciones donde se llevó a cabo el estallido de globos para la medición en el recinto. Vemos que la posición A se encuentra sobre el foso de orquesta (como se comentó, en las mediciones se encontraba completamente subido, siendo una prolongación adicional del escenario) y las posiciones B y C a ambos lados del escenario. Las posiciones auxiliares han sido definidas en los pasillos que separan las audiencias C, D y E.

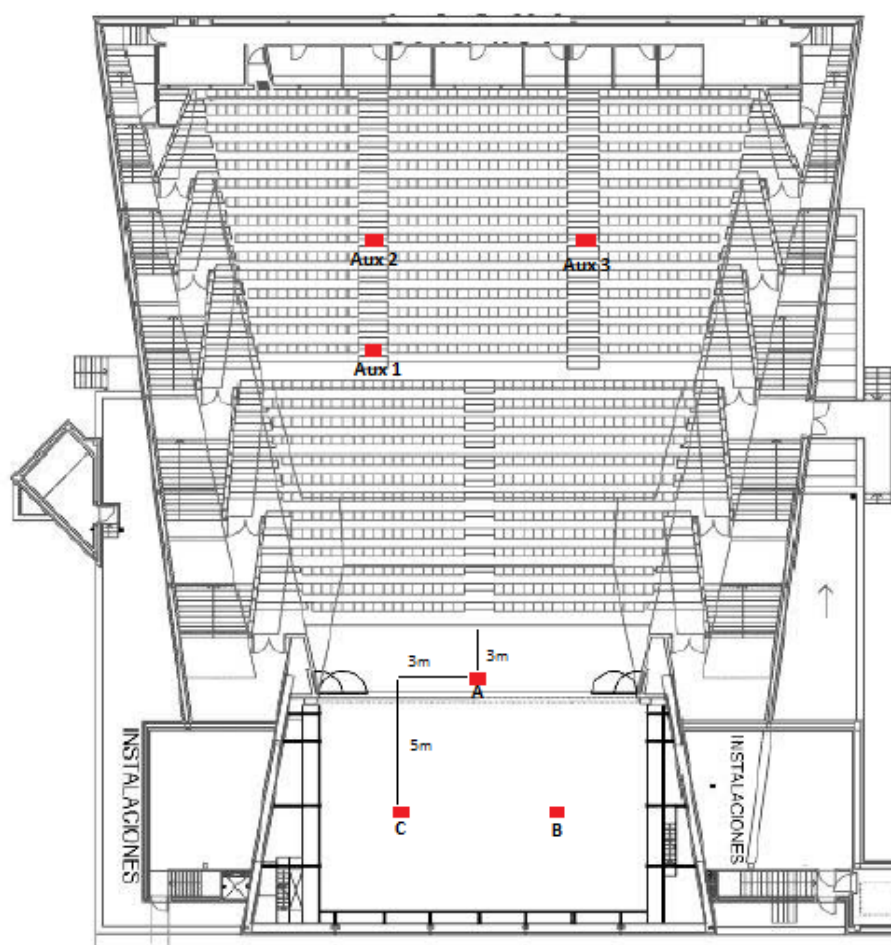


Figura 5.2. Posiciones de fuente sonora utilizadas para las medidas en el recinto.

En la [Figura 5.3] se distinguen las diferentes posiciones donde se ha situado el analizador sonoro para realizar las medidas de ajuste del modelo. Las posiciones denominadas con números han sido utilizadas también para las medidas de caracterización del recinto, y las posiciones auxiliares son únicas en esta medida.

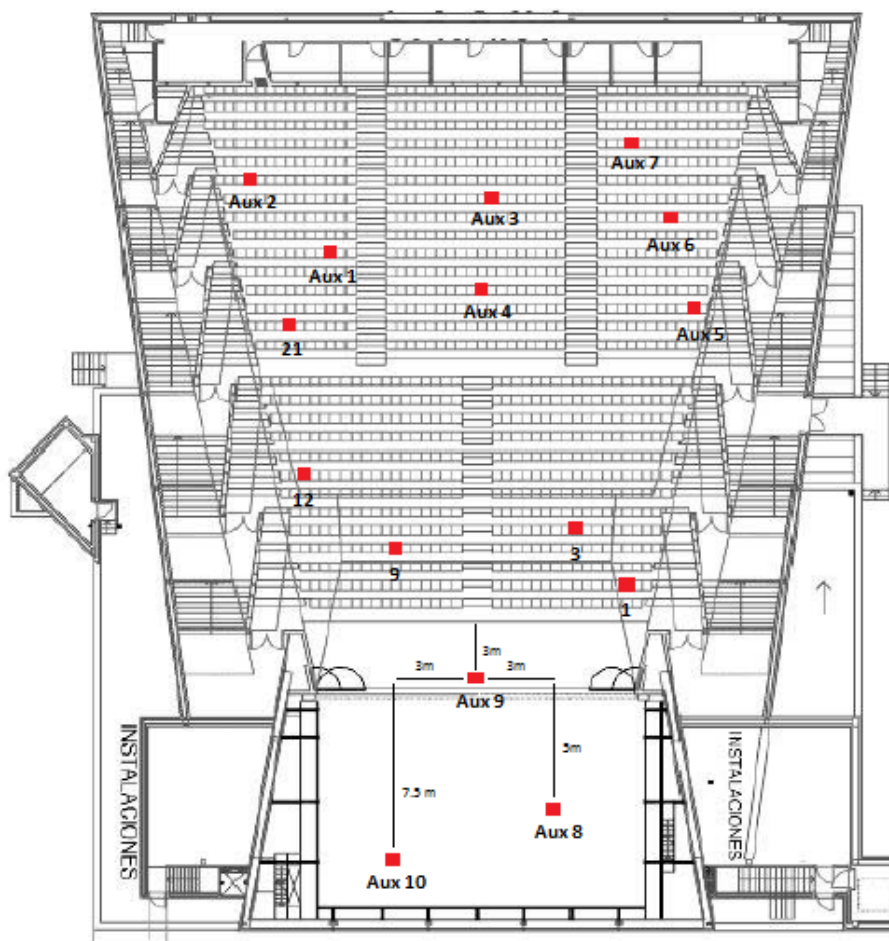


Figura 5.3. Posiciones de micrófono utilizadas para el ajuste del modelo.

Las posiciones de fuente en el escenario han sido usadas para tomar medidas con el analizador sonoro en el escenario y en las zonas de audiencia A y B. Las posiciones de fuente auxiliares se han usado para tomar medidas con el equipo de medida en las audiencias C, D y E. En la [Tabla 5.1] está detallada cada posición de fuente y micrófono usadas en las mediciones para el ajuste del modelo.

Las posiciones de fuente se han situado con el centro acústico de la misma a una altura aproximada de 2 m. Esta altura no se ha podido precisar más, ya que el estallido de los globos ha sido manual, y la altura de la explosión ha variado ligeramente entre experimentos. Las posiciones de micrófono se han situado a 1,2 m del suelo, altura equivalente a la altura media de la cabeza de un oyente

Posición de Fuente	Posición A	Sobre el foso de orquesta y centrado en el eje de simetría, a 3 m desde la terminación del foso de orquesta.
	Posición B	3 m a la derecha de la posición A (según se mira hacia la zona de butacas) y 5 m introduciéndose en el escenario.
	Posición C	Punto simétrico de la posición B. 6 m a la izquierda de la posición B.
	Posición Auxiliar 1	Pasillo que separa las audiencias D y E, a la altura de la fila 12.
	Posición Auxiliar 2	Pasillo que separa las audiencias D y E, a la altura de la fila 18.
	Posición Auxiliar 3	Pasillo que separa las audiencias C y D, a la altura de la fila 18.
Posición de Micrófono	Posición 1	Audiencia A, fila 1, tercer asiento desde la pared lateral.
	Posición 3	Audiencia A, fila 4, noveno asiento desde el pasillo central.
	Posición 9	Audiencia B, fila 3, séptimo asiento desde el pasillo central.
	Posición 12	Audiencia B, fila 7, cuarto asiento desde la pared lateral.
	Posición 21	Audiencia E, fila 13, quinto asiento desde la pared lateral.
	Posición Auxiliar 1	Audiencia E, fila 17, tercer asiento desde el pasillo que separa las audiencias D y E.
	Posición Auxiliar 2	Audiencia E, fila 21, cuarto asiento desde la pared lateral.
	Posición Auxiliar 3	Audiencia D, fila 20, octavo asiento desde el pasillo que separa las audiencias C y D.
	Posición Auxiliar 4	Audiencia D, fila 15, décimo asiento desde el pasillo que separa las audiencias D y E.
	Posición Auxiliar 5	Audiencia C, fila 14, segundo asiento desde la pared lateral.
	Posición Auxiliar 6	Audiencia C, fila 19, sexto asiento desde la pared lateral.
	Posición Auxiliar 7	Audiencia C, fila 23, cuarto asiento desde el pasillo que separa las audiencias C y D.
	Posición Auxiliar 8	Posición B de fuente.
	Posición Auxiliar 9	Posición A de fuente.
	Posición Auxiliar 10	2,5 m hacia el fondo del escenario desde la posición C de fuente.

Tabla 5.1. Ubicación de las diferentes posiciones de fuente y micrófono utilizadas para las medidas de ajuste del modelo.

sentado en las butacas.

5.1.3. Procedimiento de Medida

Las medidas realizadas para el ajuste del modelo han sido realizadas con el método impulsivo utilizando la integración inversa de Schröeder. Este método consiste en provocar un impulso acústico, ya sea con una pistola de fogueo, petardos, globos o cualquier fuente impulsiva que produzca suficiente nivel y un espectro con ancho de banda amplio. Una vez generado el impulso, se graba la respuesta al impulso en el punto bajo estudio. A partir de esta respuesta impulsiva, es posible realizar una integración inversa para obtener un decrecimiento energético promedio de todas las curvas de decrecimiento calculadas en el mismo punto, con lo que el cálculo del tiempo de reverberación a partir de esta integración puede ser realizado de una forma mucho más precisa (la normativa establece que una única medida con este método tiene la misma incertidumbre que un promedio de 10 medidas con el método de la fuente interrumpida).

Dada la gran precisión de este método, se intentó obtener los datos suficientes para el ajuste del modelo y caracterización del recinto por medio de la respuesta al impulso con integración de Schröeder. Sin embargo, el equipo de medida tiene una particularidad que dificultó en gran medida que esta opción fuera viable. Para la caracterización del modelo es necesario que los impulsos acústicos se generen sobre diferentes posiciones en el escenario y se registre la respuesta con el micrófono en toda la zona de butacas (posición lógica de emisor y receptor). El sonómetro utilizado en la medida del tiempo de reverberación con el método impulsivo funciona de la siguiente manera: hay que configurar el tipo de medida y los diferentes parámetros antes de poder proceder a la medida. Una vez que el equipo ha sido configurado [Figura 5.4], espera hasta que capta un nivel de presión lo suficientemente elevado (el impulso acústico generado) y, a partir de ahí, graba la respuesta impulsiva resultante en las bandas de frecuencia configuradas. Para ello, el sonómetro tiene un *trigger*, un umbral que es necesario superar para que la medida empiece. Aunque este nivel de *trigger* es uno de los parámetros a configurar, el mínimo nivel que se puede configurar es 90 dB.

En distancias cortas no existía ningún problema para superar el umbral de disparo de la medida, pero al explotar el globo en una zona más adentrada en el escenario o alejar el micrófono de las primeras filas de butacas, el umbral no se conseguía superar en la mayoría de ocasiones. Ante la imposibilidad de obtener una pistola de fogueo o de explotar petardos en el interior del recinto, durante algunas semanas se intentó probar a generar un impulso acústico con mayor energía, usando globos de latex de diferente diámetro. A mayor dimensión de los mismos, más resistente es el material que los conforma y, por tanto, se puede aumentar la presión del aire que contienen. Tras probar con globos de 25 mm, 30 mm y 43 mm de diámetro [Figura 5.5], se comprobó que estos últimos podían producir un nivel suficiente para superar el umbral siempre y cuando el sonómetro estuviera en las Audiencias A y B. Para posiciones más alejadas del mismo no se conseguía producir un nivel suficiente con globos.

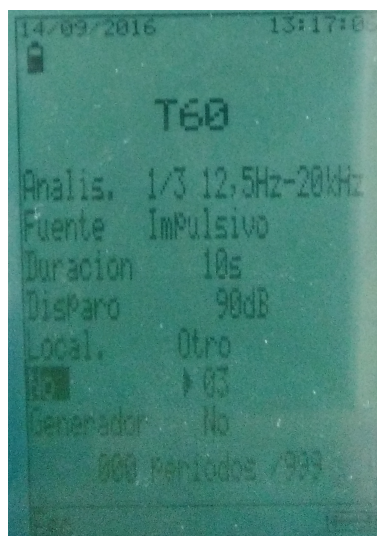


Figura 5.4. Configuración del analizador sonoro para las medidas de ajuste del modelo.



Figura 5.5. Preparación de las medidas con el estallido de globos.

La caracterización del auditorio por medio de este método se descartó ya que existían globos aún de mayor dimensión, pero no se optó por esta opción por la necesidad de bombas o compresores de aire para su inflado, la cuantía económica de los globos y que aún así no se aseguraba que este método pudiera ser exitoso en las posiciones de micrófono más alejadas del escenario. Por esta razón, se decidió aprovechar la poca incertidumbre que proporciona este método para el ajuste del modelo, donde no era necesario que la fuente se situase sobre el escenario, lo que favoreció que con los globos de 43 mm se consiguiese suficiente nivel en todas las mediciones realizadas por el método impulsivo.

La medida para el ajuste del modelo consistió, por tanto, en montar el analizador sonoro en el trípode a una altura de 1,2 m en los diferentes puntos ya especificados, configurar los parámetros de la medida, realizar el estallido del globo en las diferentes posiciones de fuente y, si se consiguió

superar el trigger, esperar en silencio 10 s, tiempo durante el cuál el equipo registra la respuesta, para evitar que ésta se vea contaminada por ningún ruido adicional. Dada la precisión del método impulsivo únicamente se registró una respuesta al impulso por posición de micrófono y fuente. También es de importancia alejarse del sonómetro durante la medida, ya que el estar cerca se puede influir en la medida, puesto que las personas actuamos como una superficie muy absorbente, principalmente por la ropa que vestimos.

5.1.4. Datos obtenidos

El cálculo de los diferentes tiempos de reverberación en cada banda de 1/3 de octava ha sido realizado mediante un post-procesado con el software **dBATI**. Este software permite la transferencia de los datos almacenados en el analizador sonoro para la inspección de las caídas registradas y el procesamiento de las mismas.

El decrecimiento de nivel en la curva medida se produce de forma exponencial. Al estar el eje vertical en decibelios, unidad logarítmica, se observa una caída lineal. El cálculo del tiempo de reverberación se define como el tiempo en que se produce una disminución del nivel de 60 dB. Sin embargo, muy pocas veces se es capaz de calcular este tiempo debido al ruido de fondo, que no permite que exista un decrecimiento de nivel tan elevado. En estos casos, existen formas alternativas de calcular el tiempo de reverberación, aunque se obtendrá el resultado con menor precisión, puesto que la caída observada es menor. Las dos formas más habituales de calcular el tiempo de reverberación es evaluando una caída de 30 dB (desde 5 dB por debajo del sonido directo a 35 dB por debajo de este nivel) y multiplicando el tiempo obtenido por un factor 2, en cuyo caso se habla de RT_{30} , o evaluando una caída de 20 dB (desde 5 dB por debajo del nivel directo a 25 dB por debajo de este nivel) y triplicando el valor resultante, obteniéndose el RT_{20} . Sin embargo, la forma más precisa de obtener el tiempo de reverberación es evaluando la mayor caída posible que permita el ruido de fondo y el nivel del sonido directo.

Dado que en ningún recinto existe un campo totalmente difuso, en la curva ETC se observan variaciones de nivel en torno a una caída lineal. Es por ello que el primer paso para calcular el tiempo de reverberación de la forma comentada en el párrafo anterior es mediante un ajuste lineal sobre el nivel registrado, ya sea un ajuste de mínimos cuadrados o un ajuste visual. Así se obtendrá una recta que aproxima la caída y sobre esta recta se podrá aplicar la búsqueda del tiempo de reverberación.

En el método usado para las medidas de ajuste del modelo no se calcula el tiempo de reverberación sobre la aproximación lineal de la curva ETC, sino que para obtener un decrecimiento prácticamente lineal se realiza la **integral de Schröder** sobre la respuesta impulsiva registrada. Esta integral inversa permite calcular el promedio de todas las curvas de decaimiento calculadas en el mismo punto, obteniéndose el tiempo de reverberación de forma mucho más precisa. El cálculo de dicho promedio es una integral inversa desde el infinito (en la práctica se puede usar un tiempo cercano

a donde el decaimiento cae por debajo del ruido de fondo) hasta el tiempo en el que se calcule el promedio de las caídas. Estas integrales se realizan sobre la respuesta al impulso cuadrática [Ecuación 5.1].

$$E(t) = \int_t^\infty p^2(\zeta)d\zeta = \int_0^\infty p^2(\zeta)d\zeta - \int_0^t p^2(\zeta)d\zeta \quad (5.1)$$

Volviendo a la inspección con dBATI, hay que añadir que el software no solo calcula el tiempo de reverberación a través de caídas de 10 dB, 20 dB y 30 dB, sino que además permite la observación de las rectas de regresión utilizadas y su ajuste manual. Del mismo modo, utilizado para el procesamiento de las medidas de ajuste del modelo, permite realizar la integración de Schröder. De esta forma, podemos observar la mejora en el cálculo del tiempo de reverberación [Figura 5.6].

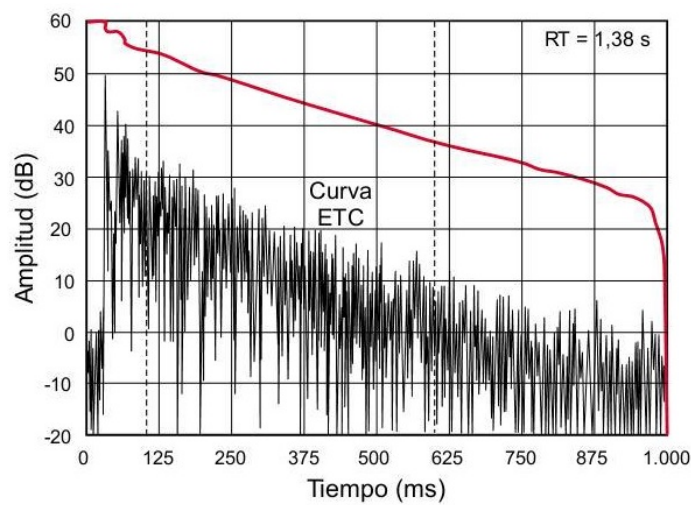


Figura 5.6. Curva ETC y el resultado de la integral de Schröder en color rojo.

En la [Tabla 5.2] se pueden observar los diferentes valores del tiempo de reverberación medidos en las distintas frecuencias, todos ellos calculados con dBATI a partir de la integración inversa de Schröder sobre las caídas registradas en la medición *in situ*.

En la [Tabla 5.3] observamos las diferentes incertidumbres en el cálculo de estas medidas, obtenidas mediante la [Ecuación 5.2]. En el cálculo de las incertidumbres se ha usado la fórmula que corresponde a la medición del RT_{20} , dado que proporciona mayor incertidumbre y, especialmente a baja frecuencia, no ha sido posible la medición de una caída elevada, debido al elevado ruido de fondo a estas frecuencias. De un modo gráfico, se observan los diferentes valores de los tiempos de reverberación obtenidos en cada medición y su desviación en la [Figura 5.7]. Podemos comparar los distintos valores obtenidos en las distintas posiciones y vemos que en baja frecuencia los valores espaciales del tiempo de reverberación difieren según la posición donde se tomen. En alta frecuencia, los valores se mantienen mucho más constantes independientemente del punto de medición. Ésto, bajo la premisa de que el recinto está bien diseñado y no existen zonas con un tiempo de

reverberación significativamente distinto, puede ser debido a la incertidumbre de medida. Como se observa en los resultados, se obtiene una gran incertidumbre en las medidas en baja frecuencia y, de ahí, puede deberse la varianza de los resultados espaciales que se obtienen en estas bandas. A alta frecuencia, se obtienen resultados muy uniformes y una incertidumbre mínima.

$$\sigma(T_{20}) = 0,88T_{20}\sqrt{\frac{1 + 1,90/n}{NBT_{20}}} \quad (5.2)$$

donde

B es el ancho de banda en Hz ($B = 0,23f_c$ al ser filtros de 1/3 de octava);

n es el número de decrementos medidos en cada posición (10 en el caso del método impulsivo, según indica la normativa utilizada);

N es el número de combinaciones de posiciones de micrófono y fuente;

T_{20} es el tiempo de reverberación obtenido en cada banda;

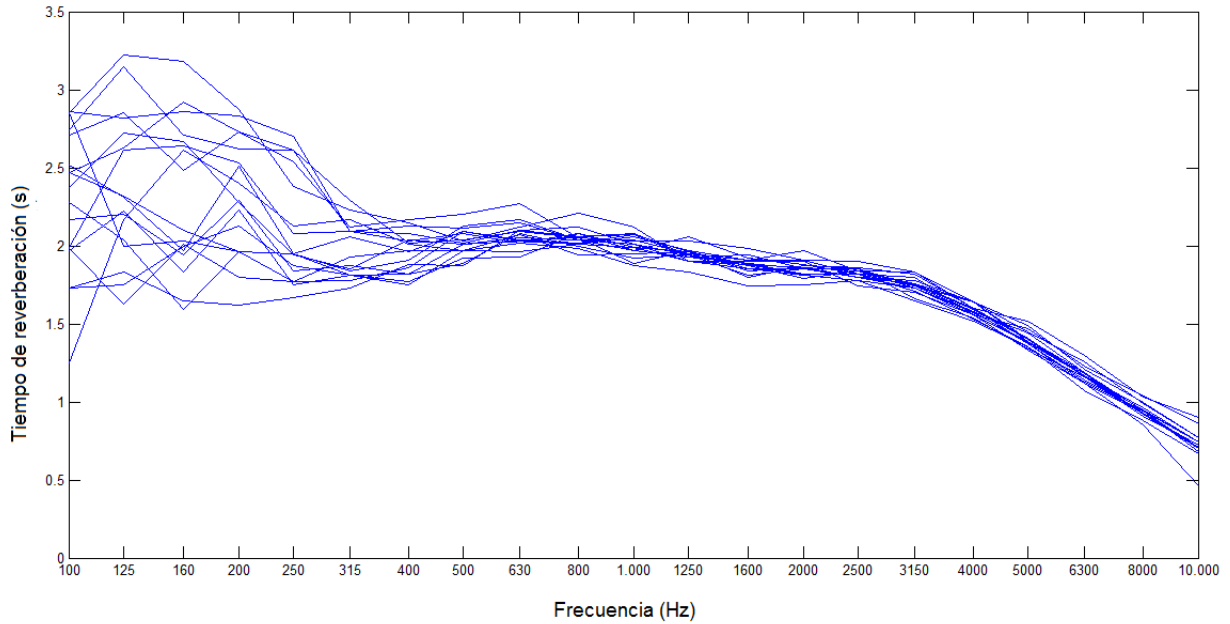


Figura 5.7. Tiempos de reverberación obtenidos en cada medida para el ajuste del modelo.

Por último, añadir que no se ha realizado ningún tipo de ajuste manual para comprobar que el valor que arroja dBATI es el óptimo y si se hubiera realizado, los resultados serían de mayor precisión. Aún así, mediante comparación de los resultados obtenidos mediante el método impulsivo y de la fuente interrumpida, del que hablaremos a continuación, se observa que los resultados arrojados por el método impulsivo tienen menor varianza y son más fiables.

Fuente	Micrófono	Frecuencia (Hz)																				
		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	6,3k	8k	10k
A	1	1,25	2,17	2,61	2,40	2,13	2,17	2,01	1,97	2,02	2,08	1,97	2,06	1,92	1,88	1,82	1,74	1,64	1,49	1,21	1,00	0,77
A	3	2,37	2,72	2,67	2,28	1,94	1,85	2,04	2,01	2,03	2,06	2,07	1,96	1,85	1,85	1,85	1,74	1,58	1,44	1,19	0,92	0,72
A	9	1,99	2,61	2,64	2,53	2,08	2,09	2,08	2,02	2,10	2,06	2,08	1,94	1,89	1,85	1,86	1,82	1,60	1,41	1,17	0,93	0,71
A	12	2,52	2,31	1,97	2,51	1,95	2,06	1,96	2,09	2,04	2,02	2,07	1,93	1,89	1,82	1,82	1,71	1,53	1,35	1,07	0,88	0,67
A	Aux 10	2,74	3,15	2,71	2,62	2,61	2,29	2,02	2,04	2,09	2,05	1,89	1,97	1,91	1,90	1,74	1,70	1,56	1,33	1,12	0,93	0,70
B	1	2,85	3,22	3,18	2,87	2,38	2,23	2,15	2,03	2,12	2,21	2,12	1,90	1,90	1,91	1,90	1,83	1,60	1,52	1,30	1,03	0,90
B	Aux 9	2,86	2,82	2,86	2,83	2,70	2,09	2,13	2,11	2,15	2,04	2,04	1,95	1,91	1,97	1,84	1,83	1,64	1,45	1,26	0,99	0,77
C	1	2,47	2,63	2,92	2,73	2,54	2,12	2,17	2,20	2,27	2,05	2,03	2,03	1,98	1,91	1,82	1,80	1,56	1,47	1,23	1,04	0,86
C	Aux 8	2,71	2,85	2,48	2,73	2,61	2,09	2,03	2,08	2,02	1,98	1,87	1,83	1,74	1,75	1,78	1,65	1,52	1,35	1,12	0,85	0,46
Aux 1	21	1,73	1,75	2,00	2,13	1,87	1,81	1,77	1,92	1,93	2,08	1,99	1,96	1,80	1,87	1,86	1,66	1,54	1,34	1,16	0,91	0,72
Aux 1	Aux 1	2,47	2,32	2,10	1,96	1,77	1,78	1,86	2,09	2,03	2,01	1,99	1,90	1,85	1,81	1,84	1,73	1,58	1,37	1,14	0,94	0,70
Aux 2	Aux 2	2,17	2,20	1,94	2,29	1,84	1,87	1,82	1,89	2,08	2,00	1,92	1,94	1,81	1,85	1,80	1,78	1,64	1,39	1,18	0,92	0,72
Aux 2	Aux 3	1,97	2,22	1,83	2,23	1,75	1,81	1,75	1,97	2,07	1,94	1,95	1,96	1,88	1,81	1,78	1,73	1,56	1,38	1,17	0,96	0,74
Aux 2	Aux 4	1,73	1,83	1,65	1,62	1,67	1,73	1,88	1,87	2,10	2,12	2,01	1,90	1,88	1,86	1,84	1,75	1,59	1,40	1,16	0,92	0,70
Aux 3	Aux 5	2,85	2,00	2,03	1,96	1,95	1,84	1,91	2,13	2,17	2,04	1,97	1,93	1,94	1,85	1,80	1,73	1,57	1,39	1,17	0,95	0,74
Aux 3	Aux 6	1,98	1,63	2,01	1,80	1,77	1,93	1,97	1,97	1,96	2,01	2,06	1,97	1,84	1,86	1,80	1,76	1,64	1,40	1,19	0,94	0,74
Aux 3	Aux 7	2,28	2,04	1,59	1,96	1,95	1,81	1,82	2,01	2,05	2,04	2,01	1,94	1,87	1,79	1,84	1,76	1,60	1,37	1,13	0,94	0,68

Tabla 5.2. Tiempos de reverberación obtenidos en las medidas de ajuste del modelo.

Fuente	Micrófono	Frecuencia (Hz)																				
		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	6,3k	8k	10k
A	1	0,22	0,26	0,26	0,22	0,18	0,17	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
A	3	0,31	0,30	0,26	0,21	0,18	0,15	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
A	9	0,28	0,29	0,26	0,23	0,18	0,16	0,14	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
A	12	0,32	0,27	0,22	0,22	0,18	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
A	Aux 10	0,33	0,32	0,26	0,23	0,20	0,17	0,14	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
B	1	0,34	0,32	0,28	0,24	0,20	0,17	0,15	0,13	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
B	Aux 9	0,34	0,30	0,27	0,24	0,21	0,16	0,15	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
C	1	0,31	0,29	0,27	0,23	0,20	0,16	0,15	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
C	Aux 8	0,33	0,30	0,25	0,23	0,20	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,01
Aux 1	21	0,26	0,24	0,22	0,21	0,17	0,15	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Aux 1	Aux 1	0,31	0,27	0,23	0,20	0,17	0,15	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Aux 2	Aux 2	0,29	0,27	0,22	0,21	0,17	0,15	0,14	0,12	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Aux 2	Aux 3	0,28	0,27	0,21	0,21	0,17	0,15	0,13	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Aux 2	Aux 4	0,26	0,24	0,20	0,18	0,16	0,15	0,14	0,12	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Aux 3	Aux 5	0,34	0,25	0,23	0,20	0,18	0,15	0,14	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Aux 3	Aux 6	0,28	0,23	0,22	0,19	0,17	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Aux 3	Aux 7	0,30	0,26	0,20	0,20	0,18	0,15	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02

Tabla 5.3. Incertidumbre de los resultados de las medidas de ajuste del modelo.

5.2. Mediciones para la Caracterización del Recinto

Esta serie de mediciones han servido para aportar datos más exhaustivos de las características acústicas de recinto, concretamente de su tiempo de reverberación y el ruido de fondo presente en el mismo.

La medida del tiempo de reverberación es el parámetro acústico de mayor relevancia en un recinto y mediante estas medidas se ha caracterizado el recinto cuando la fuente sonora se encuentra en el escenario y los receptores en la zona de butacas, la posición lógica de emisor y receptor.

Por otra parte, la medida del ruido de fondo sirve para comprobar que no existen ruidos que contaminen sustancialmente la escucha en el recinto. Esta medición ha sido usada también para introducirla en las simulaciones de EASE.

5.2.1. Equipo usado en las Mediciones para la Caracterización del Recinto

Como receptor del sonido se ha usado el mismo analizador del que ya se ha hablado en la [Sección 5.1.1.], el analizador SOLO de 01dB. La fuente de excitación del recinto ha sido un altavoz dodecaédrico [Figura 5.8] excitado con ruido rosa en el caso de la medición del tiempo de reverberación. No existe fuente alguna en la medición del ruido de fondo.



Figura 5.8. Altavoz dodecaédrico usado en las mediciones del tiempo de reverberación.

El altavoz dodecaédrico es un altavoz omnidireccional que produce un nivel similar de presión sonora en todas las direcciones del mismo. Esto se consigue gracias a la disposición en forma de

dodecaedro de los altavoces que componen el conjunto. En baja frecuencia el sonido es completamente omnidireccional y dicho patrón se va perdiendo a medida que se la frecuencia aumenta. Sin embargo, siguiendo las indicaciones de la normativa internacional consultada (UNE-EN ISO 3382-1:2009), se usa dicha fuente en estas mediciones.

Como ya se ha comentado, este altavoz ha sido excitado con un ruido rosa, un ruido aleatorio cuya densidad espectral de potencia es máxima a baja frecuencia y disminuye de nivel exponencialmente según aumenta la frecuencia (caída lineal en unidades logarítmicas como los decibelios) [Figura 5.9]. La disminución del nivel espectral del ruido rosa es de 3 dB por octava.

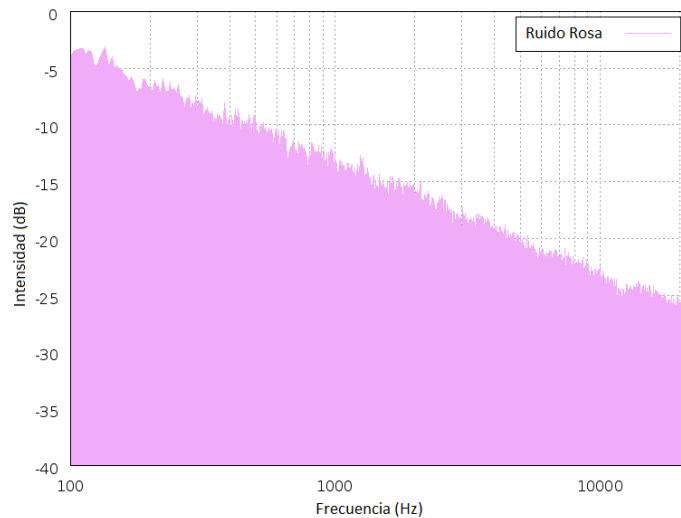


Figura 5.9. Densidad espectral de potencia del ruido rosa.

El generador del ruido rosa es un equipo autoalimentado mediante pilas, y antes de mandar el ruido rosa que genera al altavoz, es necesario una etapa de potencia. La etapa de potencia se ha conectado a la red eléctrica y puede manejar dos entradas y dos salidas. En una entrada se ha conectado el generador de ruido y en una salida el altavoz omnidireccional, según se puede observar en la [Figura 5.10].

5.2.2. Puntos de Medición en el Recinto

En las medidas del tiempo de reverberación para caracterizar el recinto, se han usado tres posiciones de fuente en el escenario y foso de orquesta del auditorio, las posiciones de fuente A, B y C, definidas en la [Figura 5.2] y la [Figura 5.1]. En estas posiciones se ha situado el centro acústico de la fuente dodecaédrica a una altura de 1,5 m sobre el suelo del escenario.

En cuanto a las posiciones de micrófono, tanto para la medición del tiempo de reverberación como para la medición del ruido de fondo, se han usado 32 posiciones distribuidas por toda la zona de butacas [Figura 5.11]. En la [Tabla 5.4] se encuentra una descripción de la ubicación de



Figura 5.10. Generador de ruido blanco y rosa (arriba) conectado a la etapa de potencia (abajo) en la entrada A.

cada posición de micrófono. El analizador sonoro se ha situado a una altura de 1,2 m en todas las posiciones.

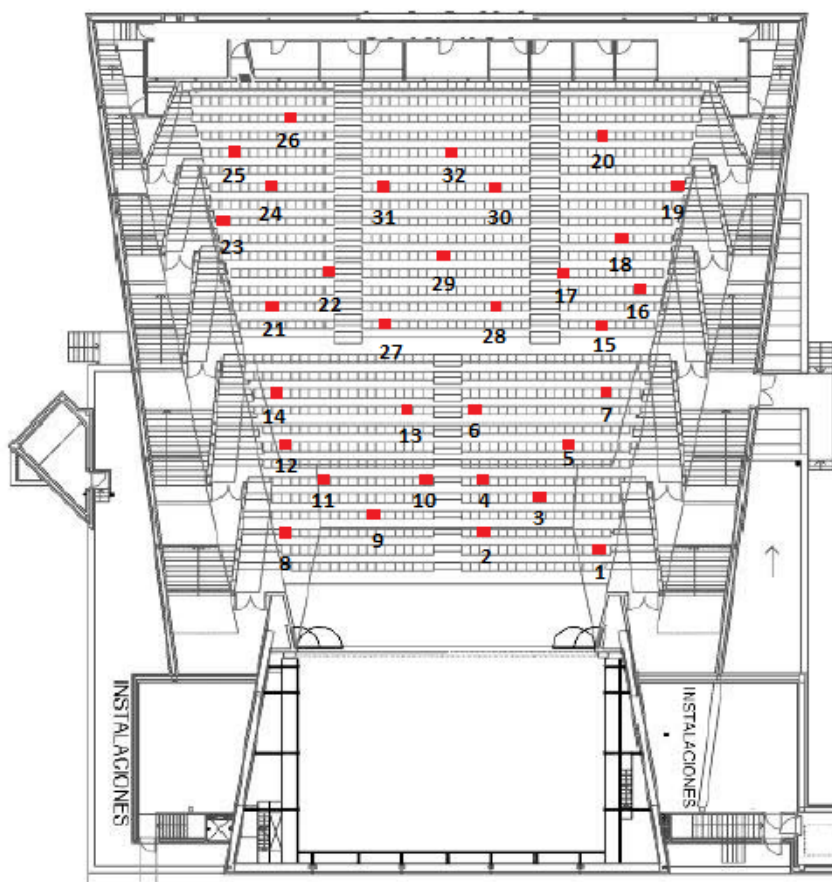


Figura 5.11. Posiciones de micrófono usadas para la caracterización del auditorio.

5.2.3. Procedimiento de Medida

La medida del tiempo de reverberación ha sido realizada por el método de la fuente interrumpida. Para ello, ha sido necesaria la utilización de todo el equipo antes descrito: analizador sonoro, fuente dodecaédrica, generador de ruido y amplificador.

En el escenario, el generador de ruido se ha conectado a la etapa de potencia y ésta, al altavoz, para mandarle el ruido aleatorio ya amplificado. La fuente se ha situado sobre las tres posiciones descritas (A, B y C). El analizador se ha ido desplazando sobre cada una de las posiciones de micrófono en la zona de butacas.

El procedimiento de la medida del tiempo de reverberación con este método es el siguiente. Se excita la fuente dodecaédrica con un ruido de banda ancha aleatorio o pseudoaleatorio y se deja emitir el ruido durante unos segundos, con lo que el campo acústico alcanza un estado estacionario. Transcurrido este tiempo, se corta bruscamente la excitación de la fuente, con lo que deja de emitir y se registra mediante el sonómetro la caída del sonido [Figura 5.12].

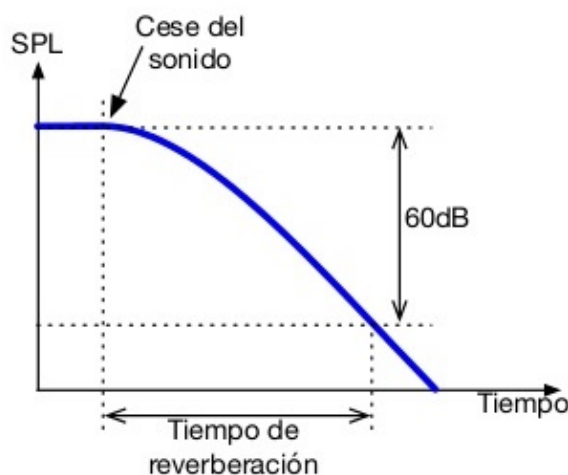


Figura 5.12. Caída tras el cese de la emisión sonora.

De esta caída registrada se pueden obtener los diferentes tiempos de reverberación.

En el sonómetro se configuraron los diferentes parámetros de la medida (medición en bandas de 1/3 de octava entre 12,5 Hz y 20 kHz, aunque se ha caracterizado el recinto en bandas de 1/3 de octava entre 100 Hz y 10 kHz, método de la fuente interrumpida, sin usar el generador de ruido del propio equipo y una medida de 10 s de duración) [Figura 5.13]. En el analizador se configuró la medida con una duración de 10 s para, una vez registrado el decrecimiento de nivel, tener en los segundos restantes una medida fiable del ruido de fondo presente en el auditorio. Sin embargo, debido a la imposibilidad de extraer el valor del ruido de fondo con dBBA de esta medida, fue necesario volver al auditorio a medir el ruido de fondo por medio de otro método.

Posición de Micrófono	Ubicación
Audiencia A	1 Audiencia A, fila 1, tercer asiento desde la pared lateral.
	2 Audiencia A, fila 2, tercer asiento desde el pasillo que separa las audiencias A y B.
	3 Audiencia A, fila 4, noveno asiento desde el pasillo que separa las audiencias A y B.
	4 Audiencia A, fila 6, tercer asiento desde el pasillo que separa las audiencias A y B.
	5 Audiencia A, fila 7, octavo asiento desde la pared lateral.
	6 Audiencia A, fila 9, segundo asiento desde el pasillo que separa las audiencias A y B.
	7 Audiencia A, fila 10, quinto asiento desde la pared lateral.
Audiencia B	8 Audiencia B, fila 2, segundo asiento desde la pared lateral.
	9 Audiencia B, fila 3, séptimo asiento desde el pasillo que separa las audiencias A y B.
	10 Audiencia B, fila 5, primer asiento desde el pasillo que separa las audiencias A y B.
	11 Audiencia B, fila 5, séptimo asiento desde la pared lateral.
	12 Audiencia B, fila 7, cuarto asiento desde la pared lateral.
	13 Audiencia B, fila 9, tercer asiento desde el pasillo que separa las audiencias A y B.
	14 Audiencia B, fila 10, cuarto asiento desde la pared lateral.
Audiencia C	15 Audiencia C, fila 12, quinto asiento desde el pasillo que separa las audiencias C y D.
	16 Audiencia C, fila 14, tercer asiento desde la pared lateral.
	17 Audiencia C, fila 15, primer asiento desde el pasillo que separa las audiencias C y D.
	18 Audiencia C, fila 17, séptimo asiento desde el pasillo que separa las audiencias C y D.
	19 Audiencia C, fila 20, primer asiento desde la pared lateral.
	20 Audiencia C, fila 23, quinto asiento desde el pasillo que separa las audiencias C y D.
Audiencia E	21 Audiencia E, fila 13, quinto asiento desde la pared lateral.
	22 Audiencia E, fila 15, primer asiento desde el pasillo que separa las audiencias D y E.
	23 Audiencia E, fila 18, primer asiento desde la pared lateral.
	24 Audiencia E, fila 20, séptimo asiento desde la pared lateral.
	25 Audiencia E, fila 22, cuarto asiento desde la pared lateral.
	26 Audiencia E, fila 24, quinto asiento desde el pasillo que separa las audiencias D y E.
Audiencia D	27 Audiencia D, fila 12, tercer asiento desde el pasillo que separa las audiencias D y E.
	28 Audiencia D, fila 13, cuarto asiento desde el pasillo que separa las audiencias C y D.
	29 Audiencia D, fila 16, décimo asiento desde el pasillo que separa las audiencias C y D.
	30 Audiencia D, fila 20, cuarto asiento desde el pasillo que separa las audiencias C y D.
	31 Audiencia D, fila 20, tercer asiento desde el pasillo que separa las audiencias D y E.
	32 Audiencia D, fila 22, décimo asiento desde el pasillo que separa las audiencias D y E.

Tabla 5.4. Descripción de las posiciones de micrófono usadas para la caracterización del auditorio.

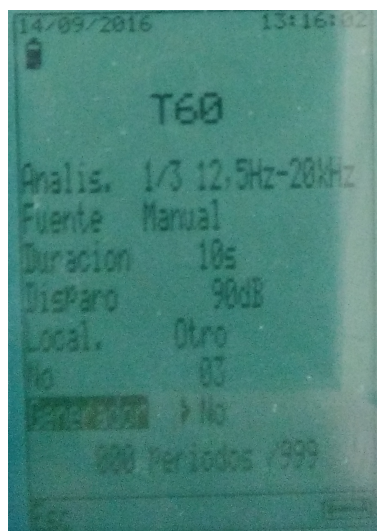


Figura 5.13. Configuración del analizador sonoro para las medidas de caracterización del recinto.

Tras indicar al equipo los parámetros y validar la medida, es necesario encender el generador de ruido, con lo que la fuente empieza a emitir, indicar al analizador que la fuente está emitiendo y, por último, volver a indicar al analizador que la fuente ha sido desconectada. A partir de este momento el equipo empieza a registrar el decrecimiento de nivel, por lo que es necesario apagar el generador de ruido instantes después de indicar que la fuente ha sido desconectada. De esta forma, en el registro de la medida tendremos el nivel estacionario del campo acústico, el instante en el que se desconecta el generador de ruido y la caída de nivel que le sucede y, finalmente, el ruido de fondo presente.

Mediante este método se han realizado 192 medidas del tiempo de reverberación. Esto es así ya que se ha realizado la medida del tiempo de reverberación en las 32 posiciones de micrófono con la fuente en cada una de las tres posiciones de fuente y 2 medidas del tiempo de reverberación por posición de micrófono y fuente para reducir la incertidumbre de la medida.

El generador utilizado para la excitación de la fuente permite elegir entre ruido blanco (cuya densidad espectral de potencia es constante en frecuencia) o ruido rosa, cuya densidad espectral de potencia es la vista en la [Figura 5.9], decreciendo 3 dB por octava. Antes de empezar la medición del tiempo de reverberación se observó el ruido de fondo presente en el recinto [Figura 5.14] y, al ver que en baja frecuencia existía un nivel muy superior al presente en alta frecuencia, se decidió usar ruido rosa. De esta forma, se consigue una mayor diferencia con el ruido de fondo en baja frecuencia y, en alta frecuencia, a pesar de generar un ruido menor, se consigue una diferencia suficiente con el ruido de fondo. Es más, en alta frecuencia se ha conseguido obtener una caída cercana a los 50 dB.

En cuanto a la medición del ruido de fondo, se ha realizado una única medición en cada una de las 32 posiciones de micrófono, con una duración de 5 s por medida. De esta forma el sonómetro calcula el Nivel Continuo Equivalente en estos 5 s y se obtiene el nivel del ruido de fondo.



Figura 5.14. Analizador sonoro midiendo el ruido de fondo.

5.2.4. Datos obtenidos

En el caso de la medida del ruido de fondo, se ha obtenido un valor por medida y banda de 1/3 de octava a partir del cálculo efectuado por el analizador, sin necesidad de software adicional.

Considerando que el muestreo espacial que se ha realizado durante la medida ha servido para caracterizar de forma adecuada los diferentes valores del ruido de fondo existente en el área de audiencia, se ha realizado un promedio espacial [Ecuación 5.3] sobre los diferentes valores obtenidos en los 32 puntos de medición, obteniéndose el valor promedio del ruido de fondo en el recinto [Tabla 5.5].

$$L_{avg} = 10 \log \left[\frac{1}{32} \sum_{i=1}^{32} 10^{L_i/10} \right] [dB] \quad (5.3)$$

Como se puede observar, existe un nivel mucho mayor del ruido de fondo en baja frecuencia, razón por la cual existe un menor margen entre nivel estacionario y ruido de fondo para el cálculo del tiempo de reverberación a partir de las caídas observadas en estas frecuencias.

En cuanto a los valores obtenidos del tiempo de reverberación, se ha usado el software dBBATI para el ajuste manual de las caídas registradas. En estos casos, debido al método de medida, no existe la posibilidad de realizar una integración de Schröder, con lo que el ajuste ha sido sobre

Frecuencia (Hz)	Ruido de Fondo (dB)
100	33,4
125	29,3
160	29,0
200	28,2
250	21,8
315	22,9
400	22,4
500	19,8
630	18,5
800	18,0
1000	17,4
1250	17,0
1600	13,1
2000	11,8
2500	9,6
3150	7,8
4000	6,9
5000	6,5
6300	6,3
8000	5,9
10000	6,0

Tabla 5.5. Valores del Ruido de Fondo presentes en el recinto en bandas de 1/3 de octava.

las curvas de decrecimiento observadas, calculando la recta que mejor aproxima la caída. De esta forma, el software permite la inspección de cada caída en cada banda de frecuencia y calcula por medio de diversos algoritmos el tiempo de reverberación [Figura 5.15].

No obstante, el software no realiza siempre el mejor ajuste de la recta, con lo que se puede obtener un tiempo de reverberación incorrecto [Figura 5.16]. Esto ha sucedido en muchas caídas en baja frecuencia, debido al poco rango dinámico entre nivel estacionario y nivel del ruido de fondo, y a la presencia en estas frecuencias de reflexiones con mucho nivel. De esta forma, en frecuencias bajas se ha obtenido una gran varianza de los niveles observados en torno a la recta lineal de caída, dificultando el cálculo de la misma y, debido a ésto, obteniéndose una menor precisión en la medida del tiempo de reverberación.

En la [Figura 5.17] se puede observar la aproximación manual (la normativa de medida indica que el ajuste manual es igual de válido que cualquier ajuste automático) realizada sobre la recta que aproxima el software [Figura 5.16] a la frecuencia de 125 Hz. Observando la [Figura 5.18] correspondiente a un decrecimiento en una frecuencia más elevada (3.15 kHz), es fácil ver que en frecuencias medias y altas el valor obtenido del tiempo de reverberación es más preciso, dado que la caída observada es más lineal.

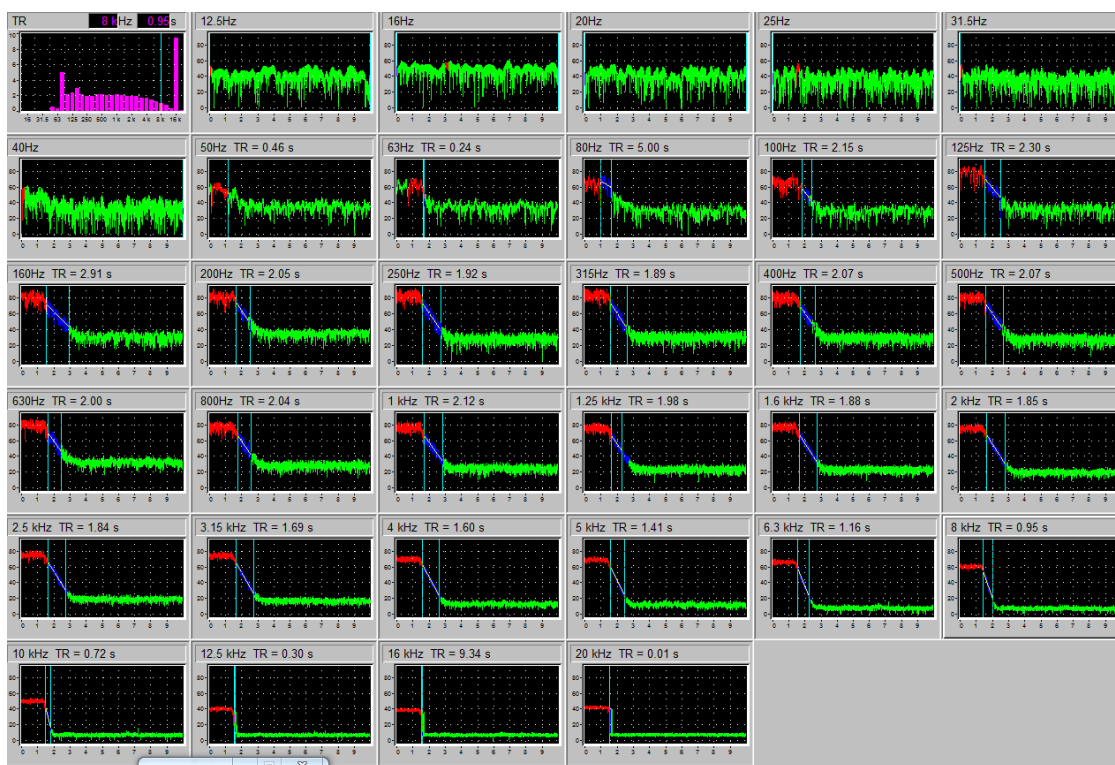


Figura 5.15. Curvas de decrecimiento de nivel observadas mediante dBATI.

De esta forma se han ajustado las caídas observadas en cada banda de $1/3$ de octava de frecuencia central comprendida entre 100 Hz y 10 kHz. Una vez calculados todos los tiempos de reverberación, se ha calculado el promedio de las dos medidas por posición, reduciendo la incertidumbre. Tanto el valor del tiempo de reverberación como el de la incertidumbre de medida (calculada según la [Ecuación 5.2]) se pueden consultar en el [Anexo A] de este documento.

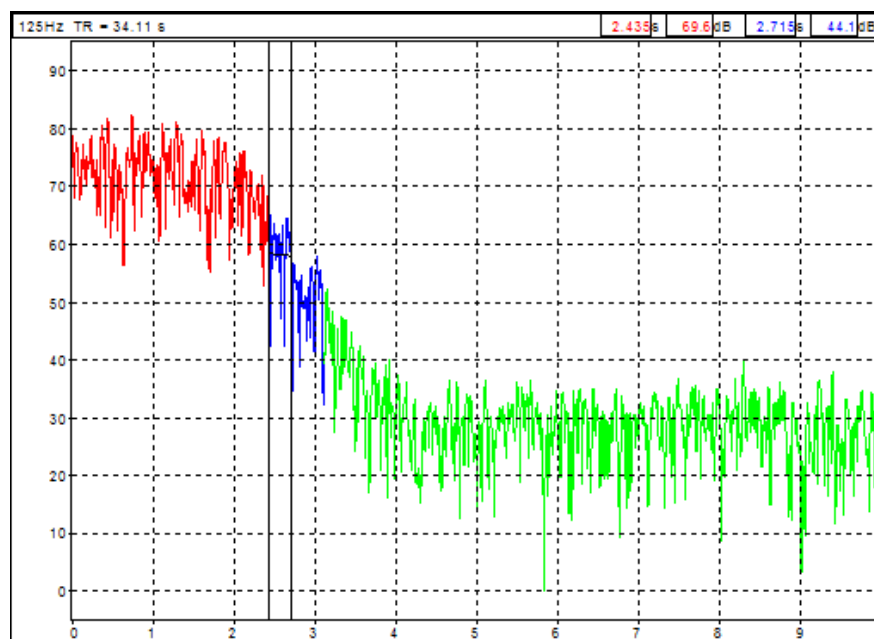


Figura 5.16. Curva de decrecimiento a la frecuencia de 125 Hz y el cálculo del tiempo de reverberación que proporciona $dBATI$ (34,11 s). Se observa en rojo el nivel estacionario, en azul la caída tras el cese de la emisión y en verde el nivel de ruido de fondo.

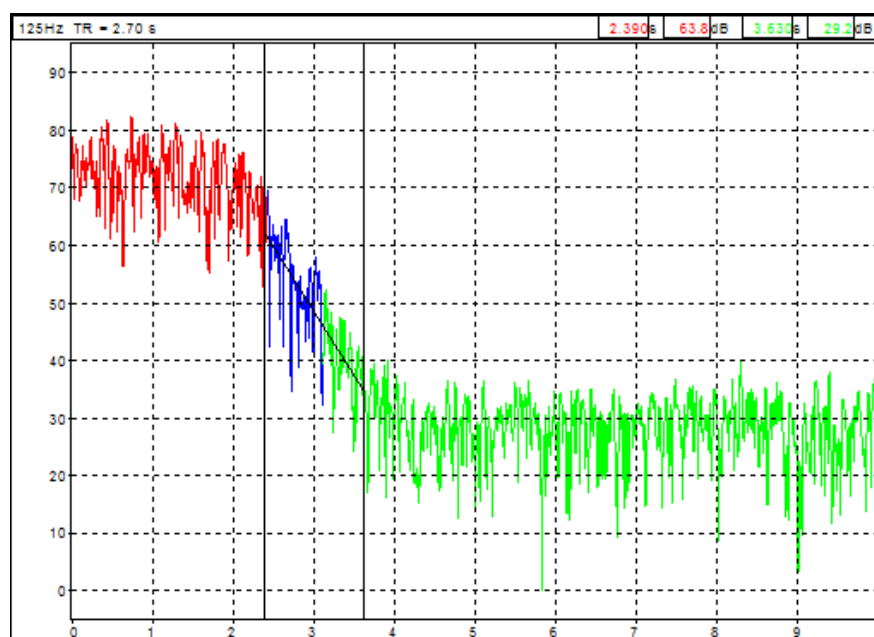


Figura 5.17. Curva de decrecimiento a la frecuencia de 125 Hz y cálculo del tiempo de reverberación tras el ajuste manual (2,70 s).

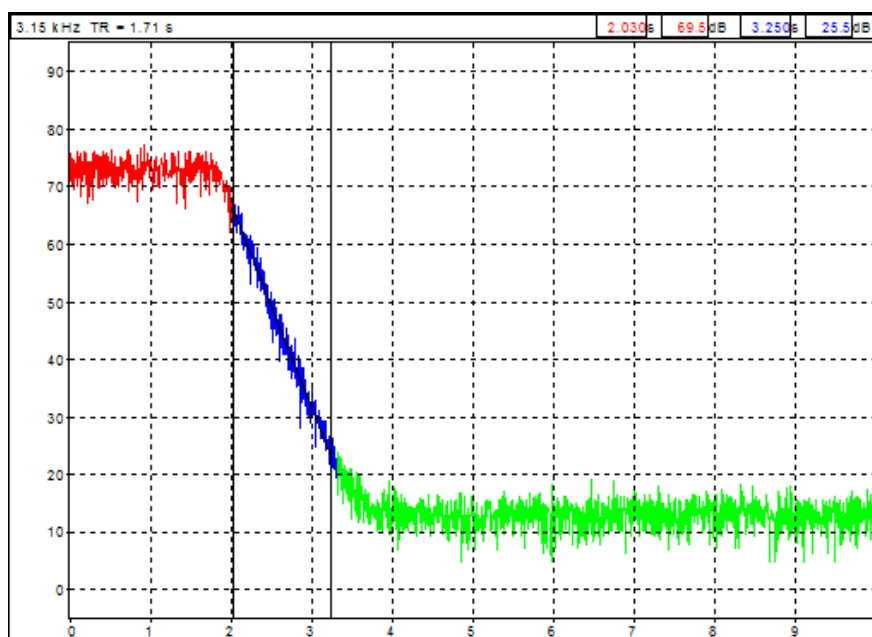


Figura 5.18. Curva de decrecimiento a la frecuencia de 3.15 kHz.

Capítulo 6

Ajuste del Modelo 3D y Simulación

En el [Capítulo 4] se detalló el proceso de creación del modelo 3D que ha sido utilizado para las simulaciones acústicas del auditorio mediante el software EASE. Antes de proceder a dichas simulaciones, es necesario terminar la creación del modelo con la inserción de algún elemento adicional y proceder, como ya se ha comentado, al ajuste del mismo con las mediciones *in situ*, para que los resultados obtenidos de las simulaciones sean fieles a la realidad existente en el auditorio.

6.1. Inserción de los Elementos Restantes y Ajuste del Modelo

Tras la definición de las diferentes superficies del modelo, es necesario asignar los elementos restantes: **áreas de audiencia** (áreas donde EASE va a calcular las diferentes propiedades acústicas), **altavoces** (fuentes acústicas que se usarán para las distintas simulaciones acústicas) y **asientos de escucha** (puntos específicos donde EASE calcula también las diferentes propiedades acústicas). Los altavoces insertados no son propios de la instalación sonora del auditorio. Se han definido tres posiciones de altavoz en el escenario del auditorio y tres en los pasillos de la zona de audiencia, dado que han sido las posiciones de fuente utilizadas en las distintas mediciones en el recinto.

Las áreas de audiencia se han insertado como superficies de altura constante encima de las filas de asientos. Así pues, se ha insertado un área de audiencia para cada fila de asientos a cada lado de los pasillos que dividen una misma fila. De esta forma, en total se han insertado 67 áreas de audiencia.

EASE calcula los diferentes parámetros necesarios para evaluar acústicamente el recinto en las áreas de audiencia y/o los asientos de escucha. Cabe destacar que ninguno de estos dos elementos tiene ningún efecto acústico sobre las simulaciones llevadas a cabo, simplemente indican al software dónde calcular los diferentes valores.

Por defecto, las áreas de audiencia se insertan a una altura de 1,2 m, lo que equivale a la altura media de la cabeza de un oyente sentado. Esta característica no se ha modificado. En la [Figura 6.1] se observan las diferentes áreas de audiencia insertadas en color verde.

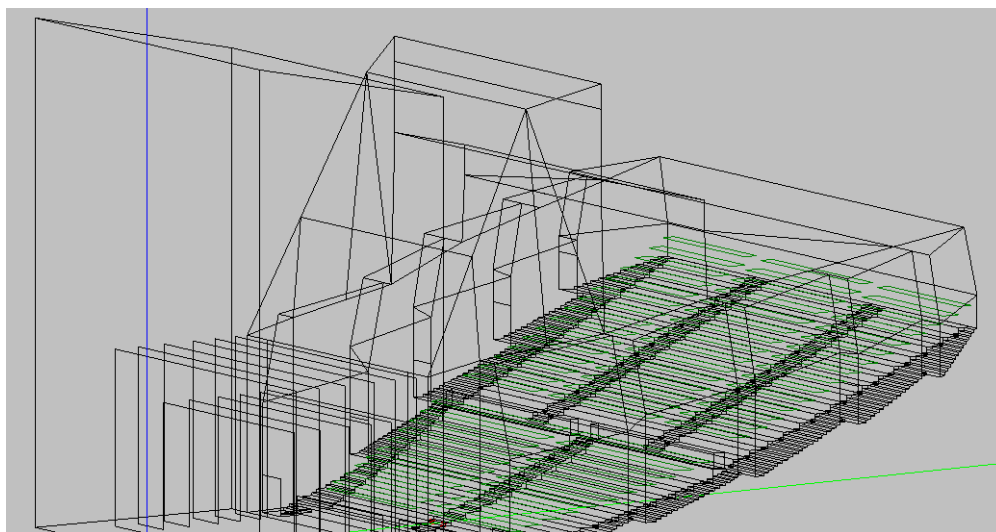


Figura 6.1. Recinto finalizado con la inserción de las áreas de audiencia.

En cuanto a los asientos de escucha, se han insertado un total de 42, siendo 32 de ellos los puntos específicos donde se ha realizado la medición con fuente dodecaédrica para la caracterización del mismo. Estos puntos se encuentran sobre las áreas de audiencia previamente insertadas. Los 10 restantes son puntos auxiliares donde se tomaron medidas con el método de la respuesta al impulso para proceder al correcto ajuste del modelo. Estos puntos se encuentran tanto sobre las áreas de audiencia ya insertadas como sobre el escenario (a una altura de $1,2\text{ m}$), ya que se tomaron medidas para el correcto ajuste de los materiales tanto de la audiencia como del escenario.

Los altavoces han sido insertados a una altura de $1,5\text{ m}$ con un modelo omnidireccional que por defecto se incluye en EASE: Loudspeaker SPHERE. El uso de este tipo de altavoz es adecuado tanto para el estallido de globos como para las medidas con la fuente dodecaédrica. Aunque a frecuencias elevadas la fuente usada en las medidas *in situ* sea una fuente con una cierta directividad, la diferencia es mínima. La fuente SPHERE se caracteriza por producir un nivel de presión idéntico en todas las direcciones [Figura 6.2].

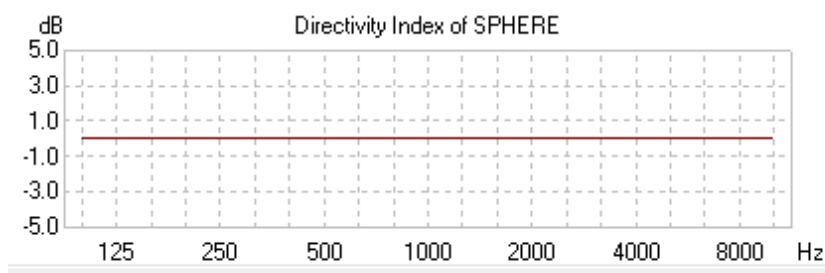


Figura 6.2. Índice de directividad de la fuente esférica.

Una vez definidos todos los elementos necesarios para proceder al ajuste del modelo [Figura 6.3], es necesario introducir un material específico a cada superficie del auditorio. Como método de ajuste de los materiales se ha usado la simulación del tiempo de reverberación que proporciona el módulo AURA.

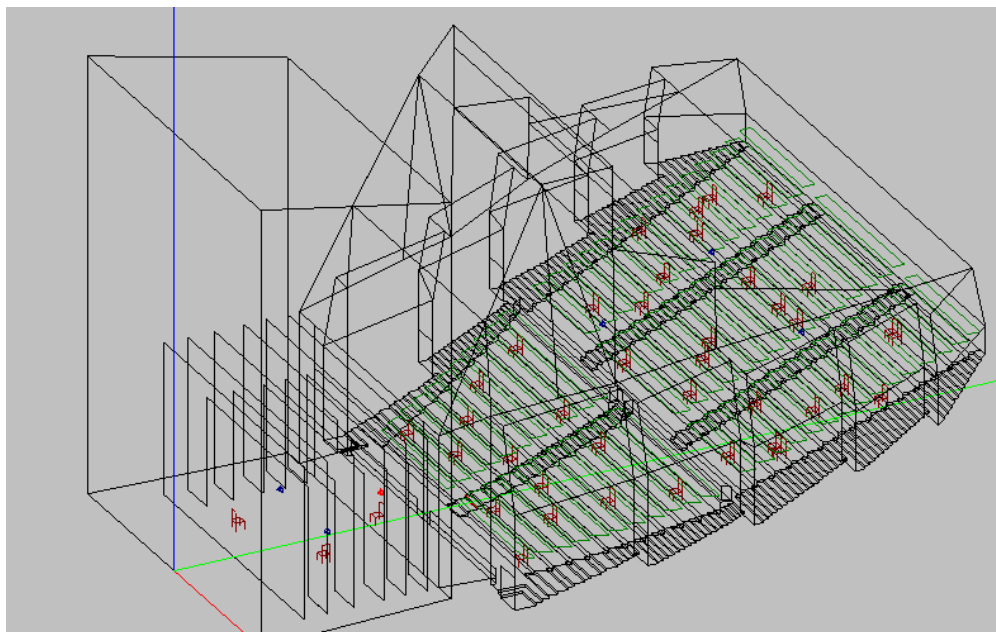


Figura 6.3. Modelo con áreas de audiencia (verde), altavoces (azul) y asientos de escucha (marrón).

Como datos de partida, se conocía de antemano que toda la superficie de madera del auditorio es de madera de haya y que el material del techo es pladur. Aún así, durante el ajuste del modelo se ha tenido que determinar el tipo de pladur, de madera y cuáles son los materiales que conforman el escenario, así como su cortinaje. Si bien existen materiales adicionales, como vidrio o el metal del telón cortafuegos, la superficie total del auditorio que ocupan es mínima y por tanto determinar correctamente su material no es tan significativo como los materiales principales.

Simulación Mediante Aura

AURA es uno de los módulos que conforman EASE, aunque no está disponible en todas las versiones del software. Entre sus utilidades, se ha usado la simulación que proporciona “*AURA Mapping*”. AURA permite el cálculo de un ecograma, a partir del cuál se obtienen muchos parámetros acústicos de interés en el recinto (en el [Capítulo 2] se proporcionó un resumen de dichos parámetros). Entre los parámetros interesantes en el ajuste del modelo se encuentran los diferentes tiempos de reverberación, T30, T20, T10 y el ecograma, que puede ser usado para evaluar algún defecto en la simulación. Por ejemplo, si en el ecograma se observasen huecos entre reflexiones, habría que aumentar la complejidad de la simulación. Antes de empezar cualquier simulación hay que indicar al software qué altavoz o altavoces están en uso, dónde va a realizar la simulación (áreas de audiencia y/o asientos de escucha), introducir el ruido de fondo presente en el recinto en bandas

de tercio de octava y ajustar los parámetros de la simulación. Tras un tiempo que depende de la complejidad de ésta, se nos muestran los resultados.

El proceso de ajuste es sencillo pero muy laborioso. Primero, se elige un altavoz de las 6 posiciones ya definidas [Figura 6.4], se indican los asientos de escucha en los que se quiere obtener los resultados [Figura 6.5] y se introduce el nivel del ruido de fondo medido in-situ [Figura 6.6]. Finalmente, como parámetros de la simulación, se han usado unas superficies lisas y planas (lo que aplica un coeficiente de scattering del 10 % en todas las superficies cuyo material no tenga definido scattering), procesamiento en paralelo con 32 hilos (disminuyendo el tiempo de espera hasta que la simulación finaliza). Como número de partículas o rayos implicados en la simulación se ha usado un número bajo (334000), obteniéndose una baja resolución y, con ello, baja precisión. Del mismo modo, para la longitud de la ventana temporal usada en el cálculo se ha usado la longitud estándar, 1710 ms. Este es el tiempo durante el cuál se calculan los diversos ecogramas, por lo que todas aquellas reflexiones posteriores a 1,71 s no serán recogidas en la simulación (EASE recomienda que la longitud de esta ventana sea de al menos 2/3 del tiempo de reverberación esperado en el recinto). Estas últimas propiedades de la simulación se pueden observar en la [Figura 6.7].

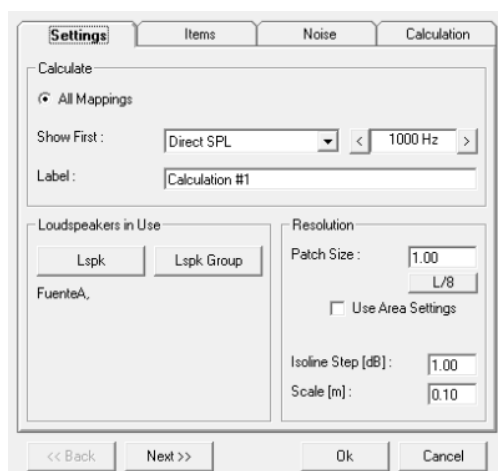


Figura 6.4. Configuración de las opciones y altavoces en AURA Mapping.

Una vez terminada la simulación, se pueden inspeccionar los ecogramas [Figura 6.9]. También es posible observar el tiempo de reverberación de forma gráfica y en forma de tabla [Figura 6.8]. Se ha usado el parámetro T30 para obtener el tiempo de reverberación, dado que cuenta con mayor precisión que el T20, que también se puede calcular. De este modo, AURA nos proporciona una simulación con suficiente detalle como para evaluar si los tiempos de reverberación obtenidos se alejan mucho de los tiempos medidos *in situ*. Una vez comprobada esta diferencia, mediante la herramienta **Optimize RT** que proporciona EASE, se buscará el cambio de algún material del recinto para aproximar mejor el tiempo de reverberación.

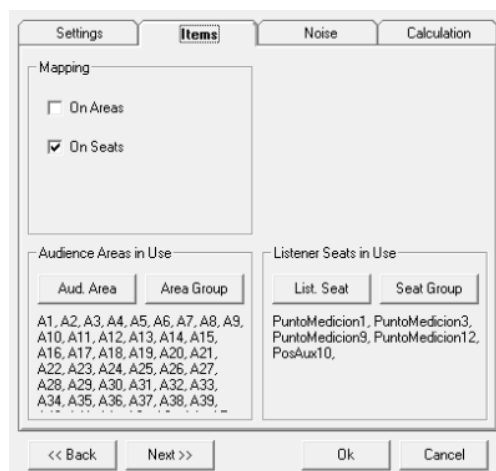


Figura 6.5. Configuración los asientos y áreas en AURA Mapping.

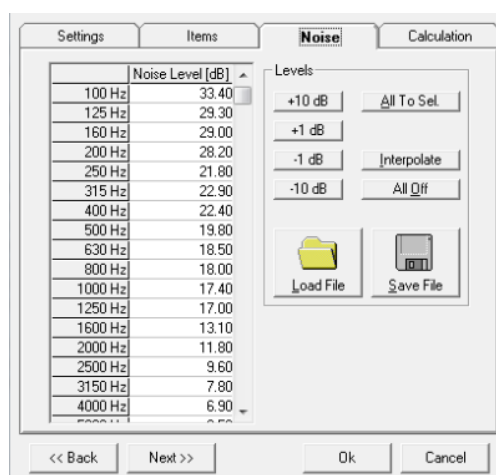


Figura 6.6. Configuración del ruido de fondo en AURA Mapping.

Optimize RT

Optimize RT es una herramienta que proporciona EASE. Entre sus utilidades está la opción de visualizar el valor del tiempo de reverberación en el recinto y fijar un valor deseado (según el cálculo de Eyring [Ecuación 6.1] o Sabine [Ecuación 6.2]). Sobre estas dos curvas del tiempo de reverberación en frecuencia es posible observar el efecto de cambiar un material por otro, así como comparar los dos materiales y sus propiedades acústicas. Del mismo modo, permite cambiar los materiales instantáneamente, sin necesidad de ir superficie por superficie cambiando su material, por lo que es una herramienta idónea en el proceso de ajuste del modelo.

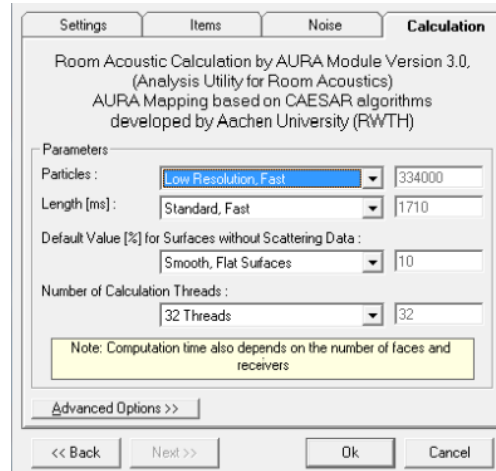


Figura 6.7. Configuración de los parámetros de la simulación en AURA Mapping.

$$RT = \frac{0,161V}{-\ln(1 - \bar{\alpha})S_t} \quad ; \quad \bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n}{S_t} \quad (6.1)$$

donde V es el volumen del recinto, expresado en m^3 ;

S_t es la superficie total del recinto, expresada en m^2 ;

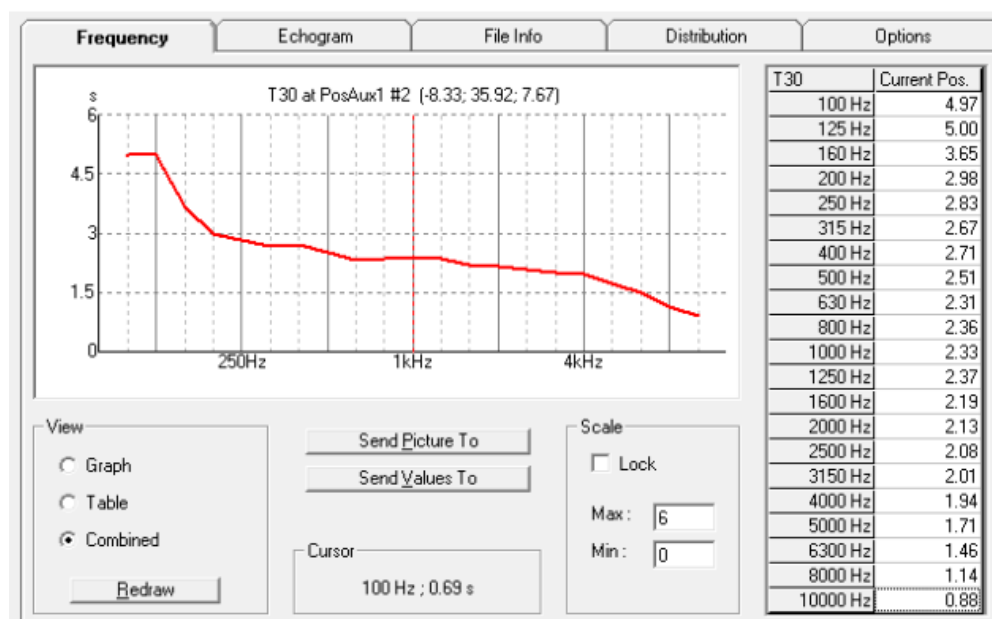
$\bar{\alpha}$ es el coeficiente medio de absorción del recinto;

α_i es el coeficiente de absorción de la superficie S_i ;

$$RT = \frac{0,161V}{\bar{\alpha}S_t} \quad (6.2)$$

En la [Figura 6.10] se pueden observar dos gráficas. En la superior, en azul, los coeficientes de absorción del material en uso (*Silla tapizado bajo*) y en verde los coeficientes de absorción de un material que se podría utilizar (*Asientos tapizado alto*). En la gráfica inferior, en azul se nos muestra el tiempo de reverberación obtenido en el recinto según la ecuación de Sabine, en gris el tiempo de reverberación deseado en el recinto y en verde el efecto sobre el tiempo de reverberación si se decidiese a cambiar el material *Silla tapizado bajo* por el material *Asientos tapizado alto*.

Sin embargo, debido a que se ha realizado un ajuste del tiempo de reverberación medido y simulado en un punto concreto de la sala, no se puede realizar el ajuste directamente sobre el tiempo de reverberación que proporciona Optimize RT, dado que para su cálculo se basa en la teoría estadística, dando un valor del tiempo de reverberación global para todo el recinto en función de su volumen y la superficie ocupada del mismo por cada material distinto. Por tanto, Optimize RT ayuda a comparar los diferentes materiales entre sí, intercambiarlos y ver el efecto sobre el tiempo de reverberación. Tras un cambio en los materiales y el tiempo de reverberación, es necesario volver a simular con AURA para comprobar el verdadero efecto sobre el tiempo de reverberación medido en un punto concreto de la sala.

Figura 6.8. T_{30} simulado con AURA.

Por tanto, durante todo el ajuste, es necesario ir simulando con AURA, viendo la diferencia entre la simulación y el resultado *in situ* y realizar algún cambio en Optimize RT para volver a simular con AURA y ver el nuevo resultado. Es necesario repetir todo este proceso hasta obtener unos resultados en la simulación lo más cercanos a la realidad.

Una vez concluido el proceso iterativo de simulación, comparación y ajuste, y obtenidos valores muy próximos en los tiempos de reverberación medidos *in situ* y simulados, se ha realizado una simulación cambiando el número de partículas usadas, hasta un total de 21371000, valor por defecto que EASE denomina “*muy alta resolución*” y se ha aumentado la longitud de la ventana temporal hasta los 2380 ms. De este modo, se obtienen los valores finales de la simulación aumentando la precisión de los resultados. La razón de no utilizar este número de detalle en todas las simulaciones

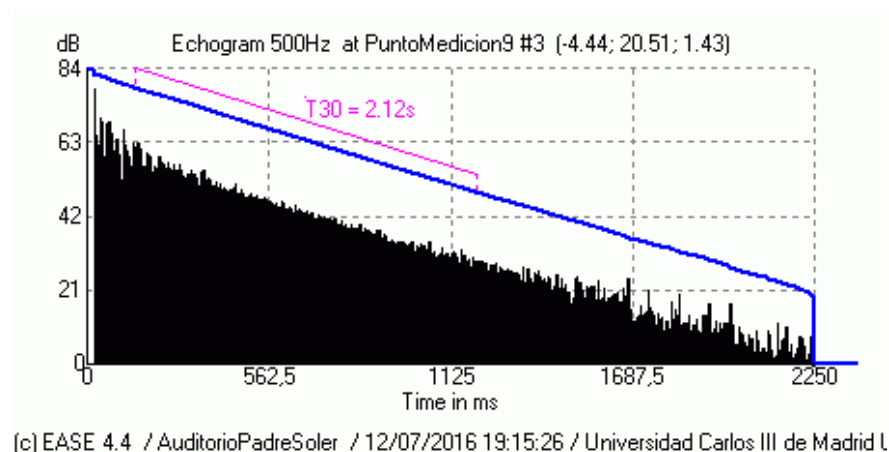


Figura 6.9. Ecograma con integración de Schröder y tiempo de reverberación calculado por AURA.

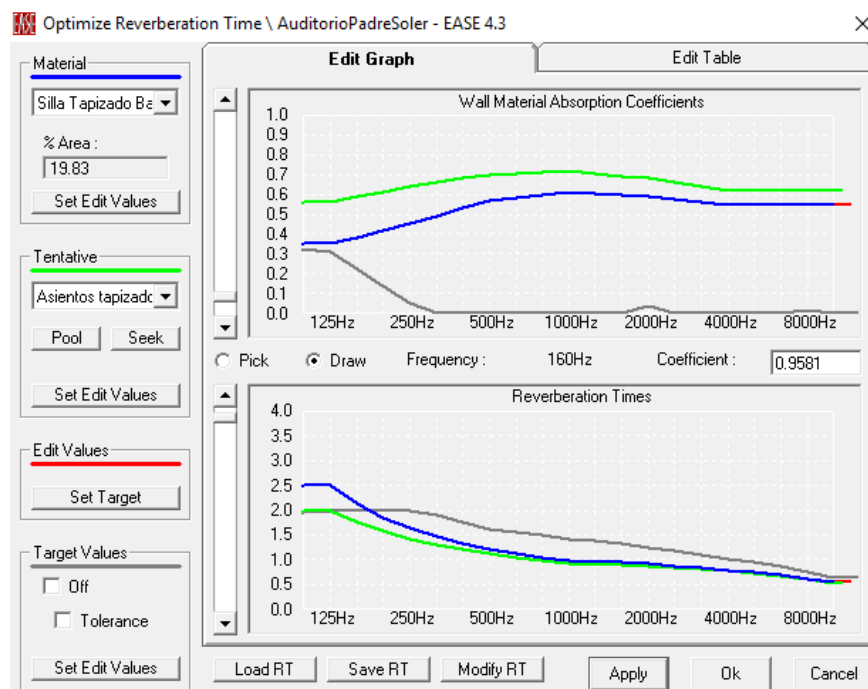


Figura 6.10. Ventana de Optimize RT.

se debe al tiempo de cómputo. Mientras que con una resolución menor la simulación se realiza en unos 2 minutos, el tiempo necesario para obtener los resultados con precisión se dispara hasta ser de unas 4 horas por posición de fuente.

Para evaluar la calidad del ajuste realizado se ha tenido en cuenta la incertidumbre de medida que arroja la norma y una incertidumbre de 0,05 s a la simulación teniendo en cuenta algún error o falta de detalle presente en el modelo. Con estas dos incertidumbres, se ha contabilizado la cantidad de valores del tiempo de reverberación que entran en el rango de ellas con respecto al total. Así, se ha pretendido que al menos 2/3 de los valores del tiempo de reverberación en frecuencia se encuentren en dicho rango para una misma posición de micrófono y fuente.

De esta forma, contabilizando el porcentaje de valores en frecuencia en el rango de la incertidumbre en cada posición de micrófono y altavoz con respecto a un máximo de 1, se obtienen los resultados que se pueden ver en la [Tabla 6.1].

Podemos observar en la [Tabla 6.1] que hay 4 puntos que no cumplen el criterio de obtener 2/3 de acierto en los tiempos. De las tres posiciones de micrófono en el escenario, en dos de ellas se obtiene un valor muy inferior a 2/3 y en la restante se iguala este valor. Ésto es debido a que se obtienen valores del tiempo de reverberación elevados con respecto a las mediciones *in situ* en frecuencias medias y altas [Figura 6.11]. Por ello, se asume que se está cometiendo un error en el escenario, ya sea de los materiales que conforman el mismo, o el grado de detalle de dicha parte, dado que no se ha podido implementar en el modelo todos los elementos presentes en el escenario.

Fuente	Micrófono	Porcentaje de valores en el rango de la incertidumbre
A	1	0,8571
A	3	0,7619
A	9	0,7143
A	12	0,6190
A	Aux 10	0,2857
B	1	0,7143
B	Aux 9	0,6667
C	1	0,7143
C	Aux 8	0,2381
Aux 1	21	0,9048
Aux 1	Aux 1	0,5714
Aux 2	Aux 2	0,8095
Aux 2	Aux 3	0,8095
Aux 2	Aux 4	0,6667
Aux 3	Aux 5	0,7619
Aux 3	Aux 6	0,9048
Aux 3	Aux 7	0,9048

Tabla 6.1. Porcentaje de acierto en los valores del tiempo de reverberación con el ajuste del modelo.

La deficiencia del escenario es compensada con los buenos resultados que se obtienen en la zona de audiencia, superando con holgura el mínimo de acierto en la mayoría de las posiciones de medición. En la [Figura 6.12] se puede ver una comparativa de los tiempos de reverberación obtenidos en una de las posiciones de audiencia.

Los diferentes materiales así como su distribución final sobre las superficies del Auditorio se detallan en el [Anexo B].

6.2. Obtención de las Propiedades Acústicas del Auditorio

Una vez que el modelo es lo más parejo posible a la realidad del recinto es cuando entra en juego la importancia de usar un software acústico para la obtención de resultados. Al igual que se usó la simulación de AURA Mapping para obtener el valor del tiempo de reverberación en los asientos de escucha, se podrá usar esta simulación para obtener los diferentes parámetros indicadores de la calidad de la sala no solo en estos asientos, sino en todas las áreas de audiencia ya insertadas en el modelo.

Se ha utilizado de nuevo la herramienta que proporciona AURA debido a su fiabilidad en el cálculo de los diferentes parámetros, y puesto que permite el cálculo de una gran cantidad de parámetros de importancia para evaluar las propiedades del recinto.

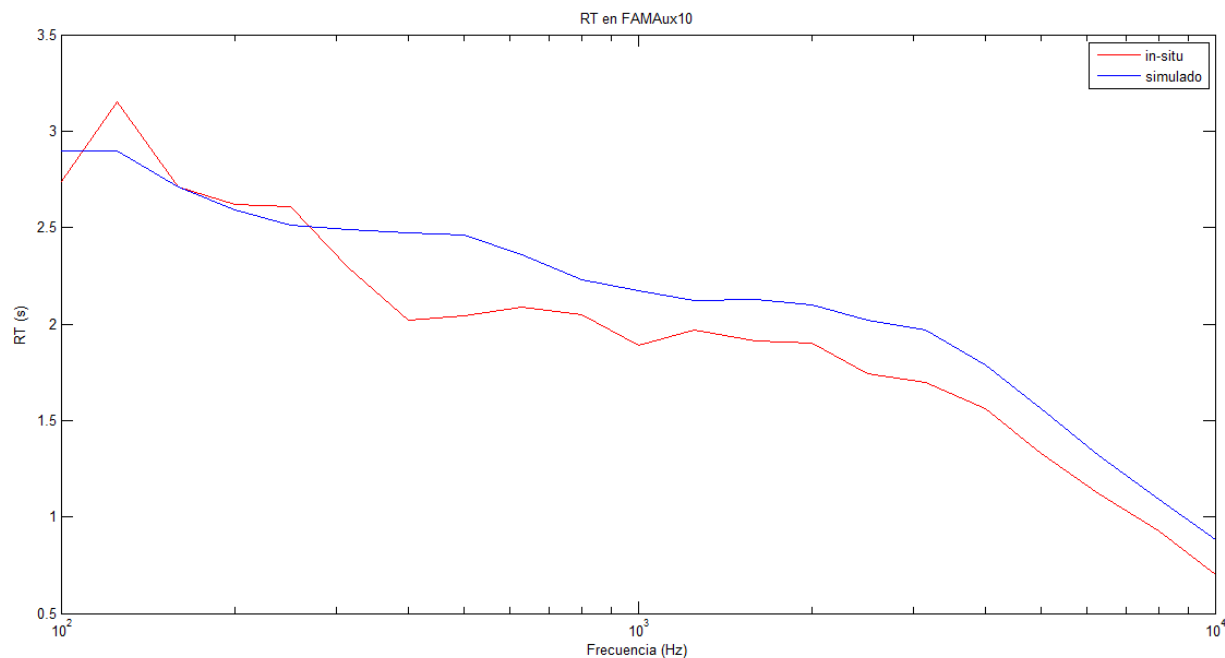


Figura 6.11. Comparación entre los tiempos de reverberación medidos *in-situ* y simulados para una posición del escenario.

Como parámetros de la simulación, se ha usado un número de partículas que proporcionan una precisión alta y se ha jugado con el parámetro *Patch Size* que modula la resolución espacial de los valores obtenidos en cada área de audiencia, de forma que la simulación sea lo más precisa posible sin consumir excesivos recursos del equipo. A menor valor del parámetro *Patch Size*, mayor resolución y más recursos se necesitan. Se ha utilizado un valor de resolución espacial de $1,2\text{ m}$, dado que reducir la resolución espacial provocaba que el consumo de memoria RAM en el equipo fuese demasiado elevado. De esta forma, AURA calcula diferentes ecogramas en las áreas de audiencias definidas, con una resolución espacial de $1,2\text{ m}$ y a partir de estos ecogramas se calculan los diferentes parámetros de importancia en el recinto.

Direct SPL es un parámetro que nos informa del nivel de presión del sonido directo que existe en el punto. Este nivel depende únicamente de la distancia respecto a la fuente sonora, según la ley de divergencia esférica [Sección 1.2.].

Total SPL es la suma entre el sonido directo (Direct SPL) y el sonido perteneciente al campo reverberante. Con este valor y el nivel de presión directo, se puede calcular el valor del nivel del campo reverberante en el punto en cuestión. El punto en el que tanto campo directo como campo reverberante toman el mismo valor se conoce como distancia crítica. Es habitual que en recintos vivos, como se supone que es el auditorio, exista un nivel de campo reverberante elevado [Figura 6.13].

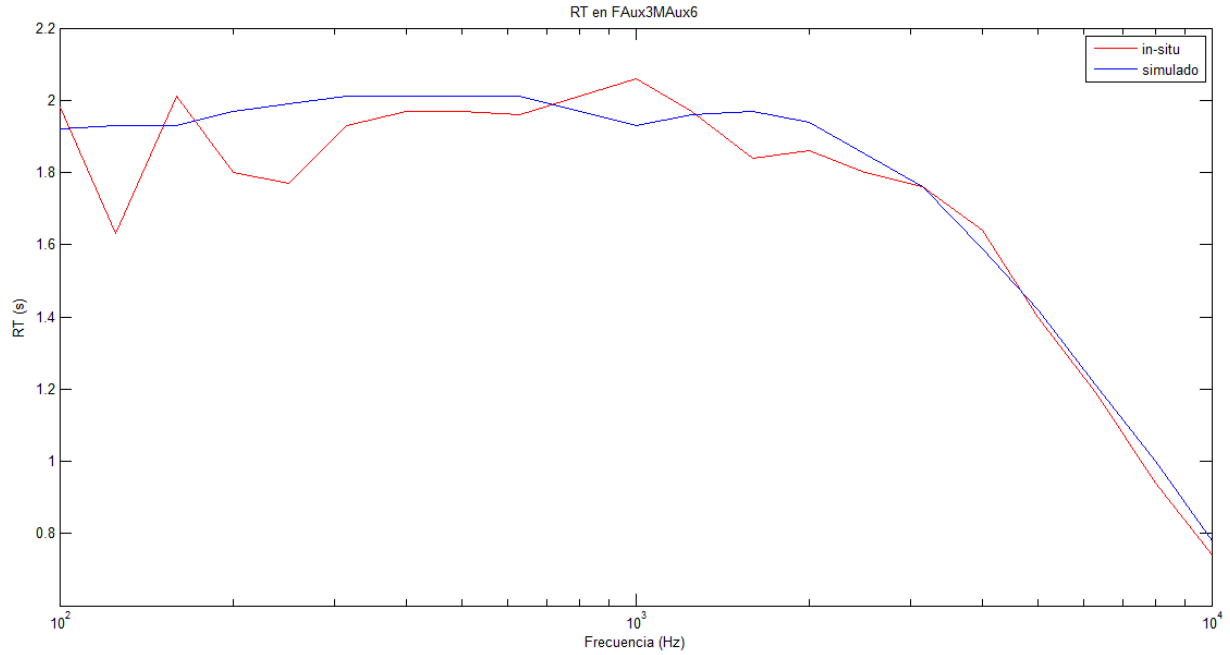


Figura 6.12. Comparación entre los tiempos de reverberación medidos in-situ y simulados para una posición de la zona de butacas.

EDT es un parámetro que cuantifica de manera más aproximada la impresión subjetiva de reverberación que percibe el oyente [Sección 2.2.2].

Tiempos de reverberación **T10**, **T20**, **T30** [Sección 2.1.2.]. El parámetro T10 evalúa un decrecimiento de tan solo 10 dB y multiplica el resultado por un factor 6, con lo que es el cálculo del tiempo de reverberación menos preciso de los 3 que proporciona AURA.

Arrival Time es otro de los parámetros que dependen de la distancia entre receptor y emisor. EASE lo calcula como el tiempo necesario en milisegundos para la llegada del sonido directo. Este

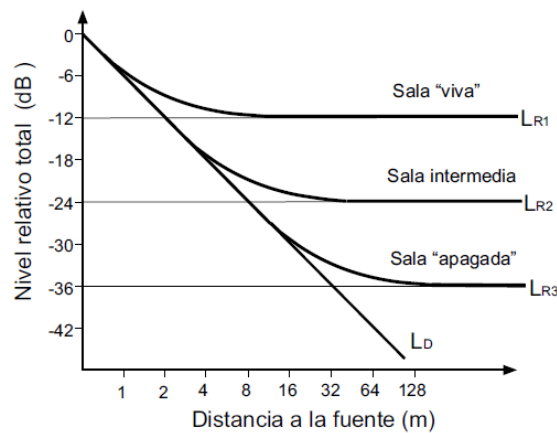


Figura 6.13. Nivel directo (L_D) y reverberante (L_R) en función de la distancia a la fuente sonora.

parámetro es mucho más útil en aquellos proyectos en los que se pretenda distribuir un conjunto de altavoces por toda la sala para que al instalar estos sistemas es sonido proveniente de ellos no cambie la localización subjetiva de la fuente, que debería estar en el escenario. Esto se consigue introduciendo un ligero retraso en el sonido proveniente de dichos altavoces.

Definition y C50. Ambos parámetros se han dado a conocer en el [Capítulo 2]. Estos parámetros, íntimamente relacionados, cuantifican de manera muy fiable la inteligibilidad del punto donde se miden, por lo que son unos de los parámetros más útiles en aquellas salas que se pretenda una buena inteligibilidad.

C80, también conocido como claridad, es el análogo del C50 en aquellas salas donde la música sea el principal objetivo [Sección 2.2.4]. Un valor elevado de este parámetro indica que se aumentará la claridad de la música escuchada en el recinto, pudiendo distinguir de forma precisa los sonidos individuales que componen el conjunto.

Center Time (t_s) es un parámetro que objetiviza la claridad e impresión espacial que el oyente aprecia del recinto. Por tanto, es un parámetro interesante en el ámbito de recintos dedicados a la música. Se calcula como el centro de gravedad de la energía recibida en el punto en el que se calcula, con el producto de las diferentes componentes de energía y su retraso frente al sonido directo [Ecuación 6.3]. Su valor se suele expresar en *ms*. A mayor valor del Center Time mayor impresión espacial se obtendrá.

$$t_s = \frac{\sum T_i E_i}{\sum E_i} \quad (6.3)$$

donde T_i es el retraso la reflexión “i”, con respecto al sonido directo;
 E_i es la energía de la reflexión “i”.

LF (Lateral Fraction) se definió en la [Sección 2.2.6.] como “Energía Lateral Precoz (J_{LF})”.

LFC (Lateral Fraction Coefficient) está muy relacionado con el parámetro anterior. Debido a que la directividad del micrófono bi-direccional tiene prácticamente la forma de un coseno y que los valores de presión están elevados al cuadrado (definición de la energía recibida), la fracción de energía lateral obtenida para una reflexión individual varía con el cuadrado del coseno del ángulo de incidencia de la reflexión. Por tanto, se puede usar una aproximación de J_{LF} con contribuciones que varían únicamente con el coseno del ángulo [Ecuación 6.4]. Si bien esta ecuación es una aproximación del cálculo de la energía lateral precoz, hay estudios que la consideran subjetivamente más precisa.

$$J_{LFC} = \frac{\int_5^{80} |p_L(t) \cdot p(t)| dt}{\int_0^{80} p^2(t) dt} \quad (6.4)$$

Sound Strength, o Fuerza Sonora, es una magnitud que caracteriza la amplificación que produce el recinto sobre el nivel recibido [Sección 2.1.7.].

STI (Speech Transmission Index) [Sección 2.1.6] es un parámetro que cuantifica el grado de inteligibilidad en un recinto. El STI se calcula a través de unos coeficientes de modulación en frecuencia y la relación señal a ruido (S/N) que se encuentre en el punto de medición. EASE nos muestra junto con el valor del STI los valores del MTI (“*Modulation Transfer Indices*”) que son usados para el cálculo del STI.

Articulation Loss (%ALCons) también es un parámetro que cuantifica el grado de inteligibilidad [Sección 2.1.6.].

Echo Speech es una forma de comprobar si alguna reflexión con gran nivel puede degradar la inteligibilidad. Su cálculo se realiza a través de una función de pesos sobre la energía de las sucesivas reflexiones del ecograma. Valores superiores a 1 pueden denotar problemas de inteligibilidad debido a la presencia de estas grandes reflexiones.

Echo Music, de forma parecida a *Echo Speech*, es una comprobación para conocer si una reflexión de energía elevada puede suponer una reducción en la calidad de la música escuchada. En este caso, valores superiores a 1,5 deben ser estudiados y valores superiores a 1,8 pueden causar una disminución de dicha calidad en la mayoría de los casos.

Capítulo 7

Resultados y Comparaciones

En los capítulos anteriores se ha descrito todo el proceso seguido para la obtención de una serie de datos sobre el recinto. Estos datos incluyen el resultado de la medición *in situ* y el resultado de la simulación software mediante EASE.

Con todos estos datos podemos obtener las diferentes propiedades acústicas del recinto, evaluadas de forma objetiva y valorar si se adapta a la suposición inicial de que es un espacio adecuado para la interpretación musical en el mismo.

7.1. Resultados aportados por la Medición In Situ

La medición *in situ* para la caracterización del recinto ha consistido, como ya se ha visto, en una medición del tiempo de reverberación mediante el método de la fuente interrumpida y una medición del ruido de fondo, que se ha usado tanto para caracterizar el recinto como para utilizarse en las simulaciones de EASE.

De esta forma, podemos analizar cómo se comporta el recinto en cuanto a tiempos de reverberación y ruido de fondo.

7.1.1. Ruido de Fondo

Los valores del ruido de fondo medidos en el recinto están recogidos en la [Figura 5.5]. El ruido de fondo tiene mayor importancia en baja frecuencia, con un valor de unos 30 *dB* en las bandas de frecuencia más baja y cercano a 6 *dB* en alta frecuencia. Esta alta componente en baja frecuencia puede deberse al sistema de climatización del recinto.

Como se vió en el [Capítulo 2], se pretende que el nivel de ruido de fondo esté muy por debajo del nivel recibido por las actividades que se realizan en el auditorio para que no sea una molestia o inconveniente en su escucha. Las curvas NC (Noise-Criteria), desarrolladas por **Leo Beranek**, son uno de los estándares más aceptados para su evaluación objetiva. Aunque estas curvas están

más relacionadas con la pérdida de inteligibilidad en el mensaje oral que la cuantía del ruido de fondo en un local destinado a propósitos musicales, también pueden ser usadas bajo este contexto. De esta forma, en auditorios se recomienda que se cumpla el criterio **NC-15-25** [Tabla 7.1]. Como puede observarse, no es permisible que se supere la curva NC-25 en ningún caso para garantizar la idoneidad del espacio.

Tipos de recintos	Curva NC recomendada	Equivalencia en dBA
Estudios de grabación	15	28
Salas de conciertos y teatros	15-25	28-38
Hoteles (habitaciones individuales)	20-30	33-42
Salas de conferencias / Aulas	20-30	33-42
Despachos de oficinas / Bibliotecas	30-35	42-46
Hoteles (vestíbulos y pasillos)	35-40	42-46
Restaurantes	35-40	46-50
Salas de ordenadores	35-45	46-55
Cafeterías	40-45	50-55
Polideportivos	40-50	50-60
Talleres (maquinaria ligera)	45-55	55-65
Talleres (maquinaria pesada)	50-65	60-75

Tabla 7.1. Curvas NC recomendadas para diferentes tipos de salas.

En la [Tabla 7.2] se detalla el nivel máximo que dichas curvas presentan en cada banda de octava centrada entre 63 Hz y 8 kHz. Si bien las curvas NC permiten evaluar el nivel de ruido de fondo cuando es medido en bandas de octava, y las mediciones *in situ* han sido realizadas en bandas de 1/3 de octava debido a que en EASE se deben introducir en este formato, es posible su conversión.

Curva / Frecuencia	63	125	250	500	1 k	2 k	4 k	8 k
NC 15	47	36	29	22	17	14	12	11
NC 20	51	40	33	26	22	19	17	16
NC 25	54	44	37	31	27	24	22	21
NC 30	57	48	41	35	31	29	28	27
NC 35	60	52	45	40	36	34	33	32
NC 40	64	56	50	45	41	39	38	37
NC 45	67	60	54	49	46	44	43	42
NC 50	71	64	58	54	51	49	48	47
NC 55	74	67	62	58	56	54	53	52
NC 60	77	71	67	63	61	59	58	57
NC 65	80	75	71	68	66	64	63	62
NC 70	84	79	75	72	71	70	68	68

Tabla 7.2. Valores en dB de las curvas NC en bandas de octava.

La conversión de las curvas NC en 1/1 octavas a curvas NC en 1/3 de octava se realiza gracias a un documento presentado en el congreso *TecniAcústica* celebrado en Valladolid en 2013 [Bibliografía [30]]. Para el cambio a 1/3 de octava, se ha calculado el nivel de ruido total de cada curva NC y se ha aproximado por una curva con la misma forma y mismo nivel de ruido total en 1/3 de octavas. De esta forma, en la [Tabla 7.3] se ven los niveles de las curvas NC-15 y NC-25 en 1/3 de octava.

Curva / Frecuencia	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
NC 10	40,5	36,8	33,3	30,0	26,6	24,0	21,7	19,7	17,8	16,1	14,3	12,4	10,7	9,1	7,6	6,6	6,0	5,6	5,4	5,4	5,3	5,3
NC 15	42,6	38,9	35,4	32,1	28,7	26,0	23,8	21,8	19,9	18,2	16,4	14,5	12,7	11,2	9,7	8,7	8,1	7,7	7,5	7,4	7,4	7,4
NC 20	46,3	43,0	39,7	36,3	32,8	30,0	27,5	25,4	23,6	22,1	20,7	19,2	17,8	16,4	15,0	14,0	13,2	12,6	12,3	12,2	12,1	12,1
NC 25	49,3	46,2	43,1	40,0	36,8	34,1	31,7	29,8	28,1	26,8	25,4	24,1	22,8	21,5	20,1	19,0	18,2	17,6	17,2	17,0	16,9	16,9
NC 30	52,3	49,4	46,6	43,8	40,7	38,2	36,0	34,0	32,2	30,8	29,3	27,9	26,7	25,6	24,6	23,9	23,5	23,2	23,1	23,1	23,1	23,1
NC 35	55,4	52,8	50,2	47,6	44,8	42,4	40,2	38,3	36,7	35,4	34,1	32,9	31,8	30,7	29,7	29,0	28,5	28,2	28,0	28,0	28,0	28,0

Tabla 7.3. Valores en dB de las curvas NC en bandas de 1/3 octava.

De esta forma, vemos que los niveles de ruido de fondo medido *in situ* superan en algunos puntos la curva NC-15 pero en ningún caso se sobrepasa la curva NC-25 [Figura 7.1]. Así, se comprueba que los niveles del ruido de fondo son correctos para este tipo de recinto, no perjudicando apenas la escucha en el interior del mismo.

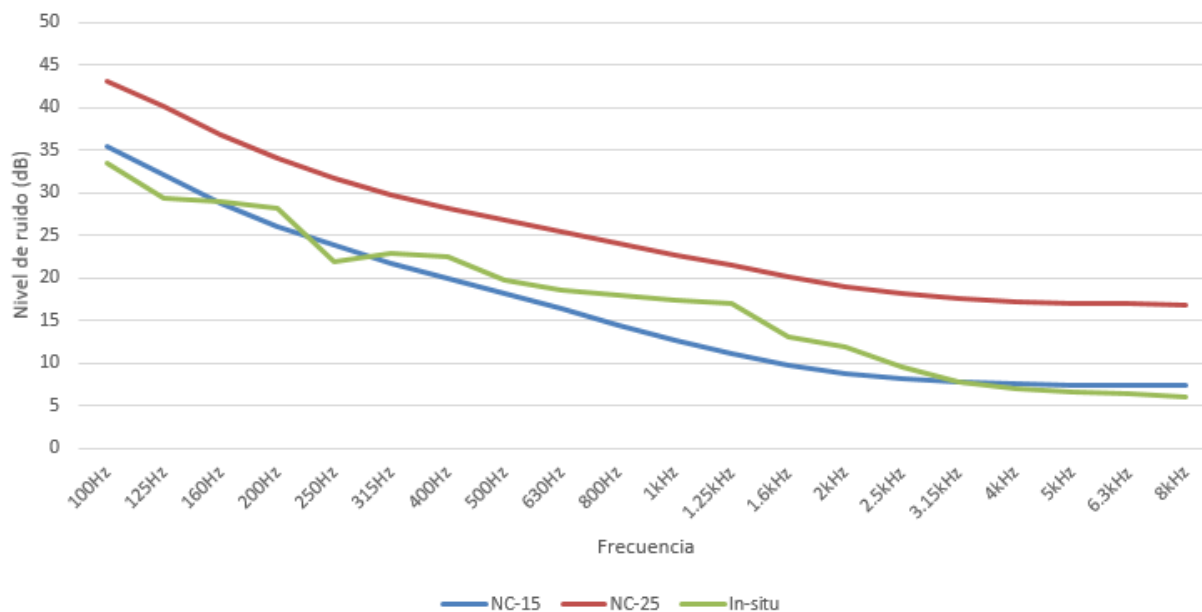


Figura 7.1. Comparación de los niveles de ruido de fondo medidos *in-situ* con las curvas NC recomendadas.

7.1.2. Tiempo de Reverberación

En el [Anexo A] se han recogido los valores del promedio de las dos mediciones por posición del tiempo de reverberación mediante el método de la fuente interrumpida (32 posiciones de micrófono y 3 posiciones de altavoz). De esta forma se ha obtenido un total de 96 conjuntos de valores y su respectiva incertidumbre.

Observando dichos valores, se ha encontrado una medida que está fuera de la media. Cuando la fuente está situada en el punto A y el micrófono se encuentra en el punto 1, a la frecuencia de 100 Hz se ha obtenido un tiempo de reverberación muy bajo, 1,21 s (método de la fuente interrumpida) o 1,25 s (método impulsivo), alejado del resto de tiempos de reverberación medidos a esa frecuencia. Al poder encontrar este valor diferente tanto en las medidas con el método impulsivo como en las medidas con el método de la fuente interrumpida, se reduce en gran medida la probabilidad de que ese valor alejado del resto sea un error de la medición. Este valor fuera de la media no ha sido modulado en el ajuste del modelo [Figura 7.2]. No se ha encontrado una razón de peso para la existencia de este tiempo de reverberación. Sí que es cierto que en la primera fila no existe ninguna reflexión de importancia desde el suelo, debido a la barrera que separa el foso de orquesta de la zona de audiencia, aunque esto se repite para las posiciones B y C de fuente (en las que el tiempo de reverberación no presenta un resultado diferente a la normalidad [Figura 7.3]). Tampoco existe ningún elemento de importancia que no haya sido modelado mediante EASE. Tal vez la causa de este fenómeno sea alguna superficie cuyo material no haya sido modelado de forma óptima. En el escenario, como ya se ha comentado, se tiene un ligero error en el tiempo de reverberación a frecuencias medias y altas. Si bien una parte de este error puede ser debida a la mala elección de un material, su causa principal parece ser el que no se haya podido modelar con todo grado de detalle los diferentes elementos del mismo (escaleras, techos a media altura, cortinaje extra...). Uno de los materiales que pueden ser causa de que la simulación no obtenga un tiempo de reverberación en 100 Hz similar a la medida con la fuente en el punto A y el receptor en el punto 1 es el material *Revestimiento Textil de Muros*, material muy genérico que puede no adaptarse bien a la realidad presente en el auditorio.

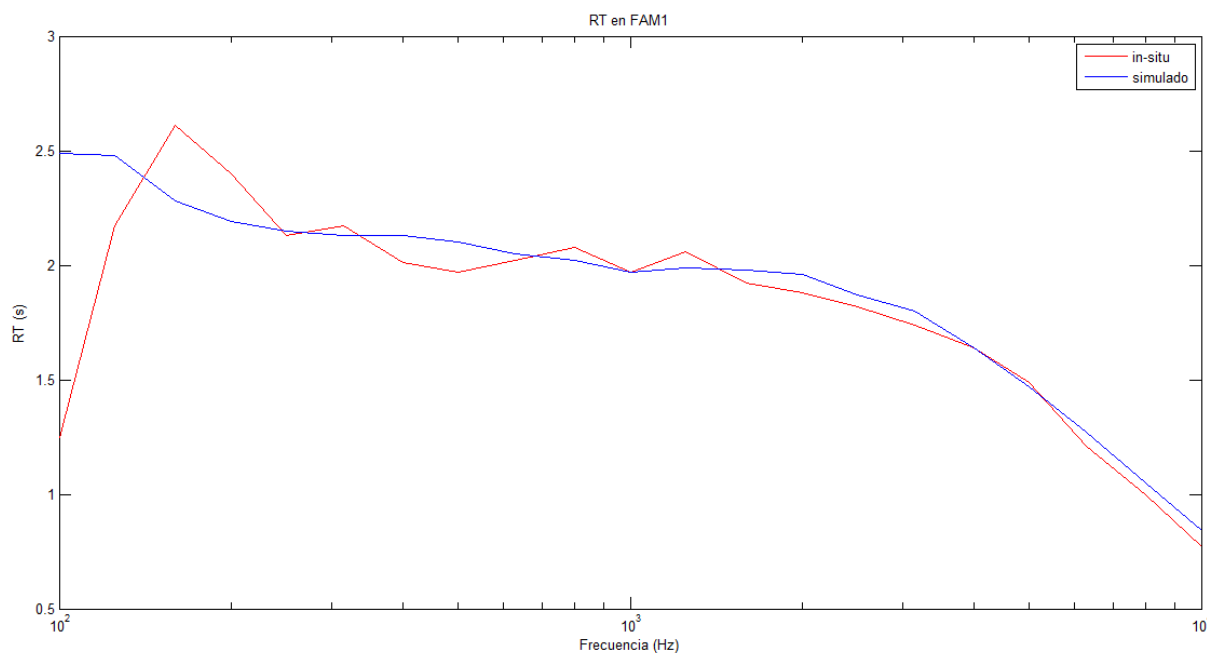


Figura 7.2. Tiempo de reverberación medido in situ y simulado en el punto anómalo (Fuente A, Micrófono 1).

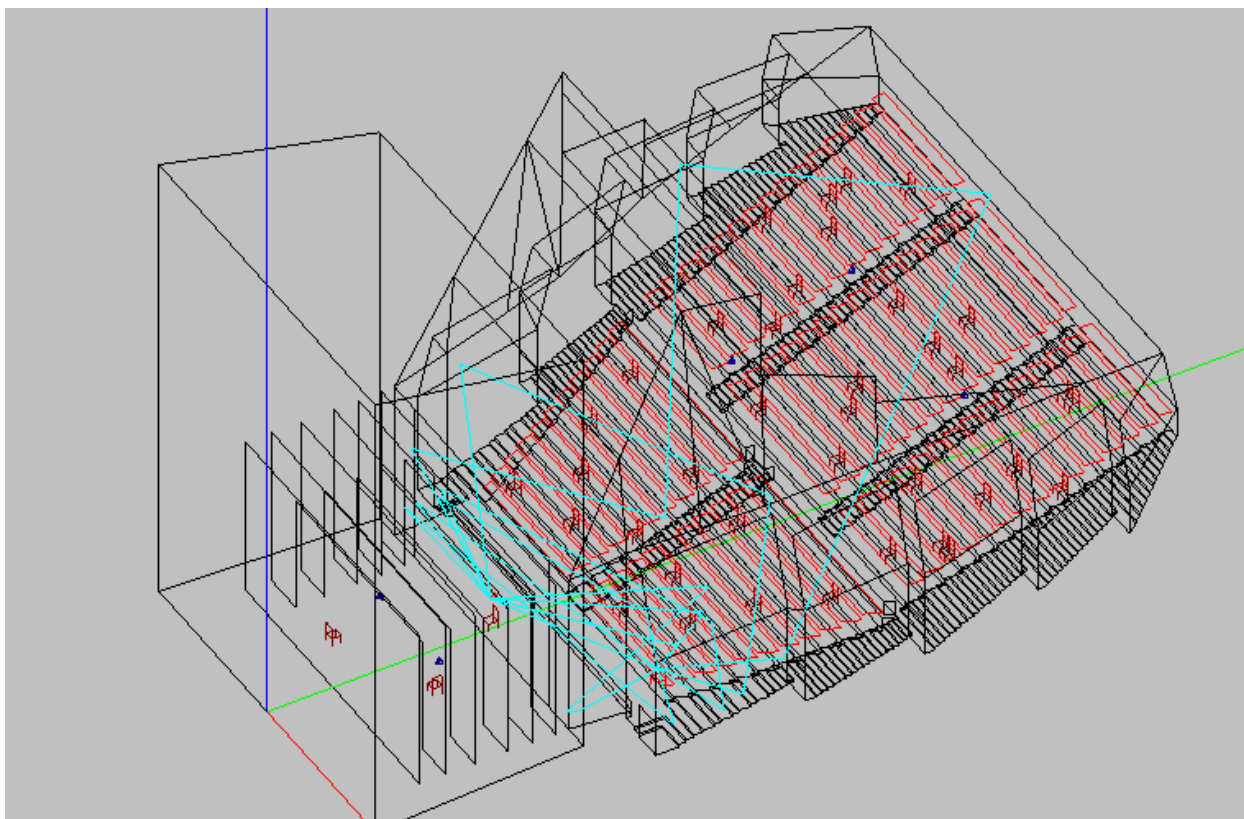


Figura 7.3. Camino seguido por las reflexiones hasta orden 5 en el punto anómalo (Fuente A, Micrófono 1).

Quitando el punto anterior a la frecuencia de 100 Hz, no se ha encontrado ninguna zona en la que exista un tiempo de reverberación sustancialmente distinto al resto. Sí que existe una elevada varianza especialmente en frecuencias bajas, pero entra dentro del elevado rango de incertidumbre que se obtiene a dichas frecuencias [Figura 7.4]. De esta forma, se ha considerado que la sala cuenta con un tiempo de reverberación lo suficientemente constante para poder realizar un promedio espacial sobre los valores medidos sin diferenciar ninguna zona con un tiempo de reverberación distinto.

Así, de acuerdo a la norma, se ha realizado un promedio espacial (tanto con las diferentes posiciones de micrófono como de altavoz) en una misma zona de audiencia. De esta forma se obtiene un valor del tiempo de reverberación con menor incertidumbre que describe el comportamiento de la sala en cada área de audiencia de las 5 descritas anteriormente. Los valores de estos tiempos de reverberación, así como sus incertidumbres, se pueden observar en la [Tabla 7.4] y la [Tabla 7.5], respectivamente.

De esta forma, gracias al promedio realizado obtenemos los valores del tiempo de reverberación de forma mucho más precisa, con una incertidumbre cercana a 0,1 s en frecuencias bajas y prácticamente despreciable en alta frecuencia. Además, los valores obtenidos prácticamente no varían

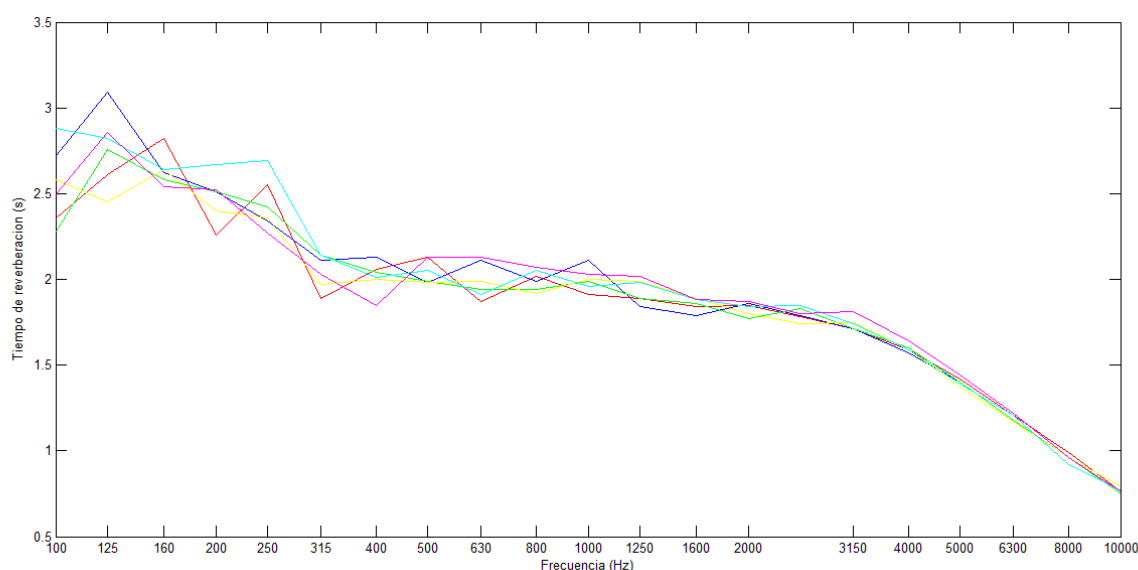


Figura 7.4. Comparación del tiempo de reverberación obtenido en las distintas posiciones de una misma audiencia.

Audiencia	Frecuencia (Hz)																				
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	6,3k	8k	10k
A	2,44	2,72	2,63	2,54	2,30	2,10	2,06	2,06	2,02	2,03	1,99	1,95	1,86	1,84	1,83	1,74	1,60	1,41	1,21	0,99	0,81
B	2,56	2,67	2,57	2,46	2,29	2,07	2,04	2,01	2,06	2,02	2,01	1,93	1,85	1,83	1,81	1,73	1,59	1,41	1,20	0,99	0,81
C	2,54	2,64	2,61	2,48	2,33	2,06	2,01	2,09	2,07	2,03	2,01	1,95	1,88	1,84	1,80	1,74	1,60	1,40	1,19	0,96	0,75
D	2,53	2,62	2,63	2,42	2,31	2,05	2,03	2,06	2,03	2,02	2,01	1,95	1,86	1,84	1,81	1,73	1,60	1,40	1,19	0,96	0,76
E	2,56	2,74	2,59	2,39	2,36	2,13	2,01	2,05	2,06	2,04	1,97	1,95	1,86	1,83	1,81	1,74	1,60	1,40	1,19	0,97	0,75

Tabla 7.4. Valores del tiempo de reverberación (en segundos) tras el promedio por áreas de audiencia.

entre las distintas áreas de audiencia del auditorio, obteniéndose un tiempo de reverberación muy constante en todos los puntos del recinto [Figura 7.5]. Observando la figura se puede ver cómo a la frecuencia de 100 Hz el valor obtenido en la Audiencia A se aleja un poco del resto, debido al punto anómalo con el tiempo de reverberación inferior.

De lo anterior, se podría haber realizado un último promedio entre las 5 áreas de audiencia para obtener un único resultado que describiese la totalidad del recinto, pero no se ha considerado necesario dado que la diferencia entre los valores obtenidos en las distintas áreas de audiencia es mínima. Como puede observarse, existe un tiempo de reverberación entorno a 2,5 s en frecuencias bajas (100–250 Hz), se mantiene constante en 1,9 – 2 s a frecuencias medias y, a partir de 2 kHz

Audiencia	Frecuencia (Hz)																				
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	6,3k	8k	10k
A	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
B	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
C	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
D	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
E	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Tabla 7.5. Incertidumbre del tiempo de reverberación (en segundos) tras el promedio por áreas de audiencia.

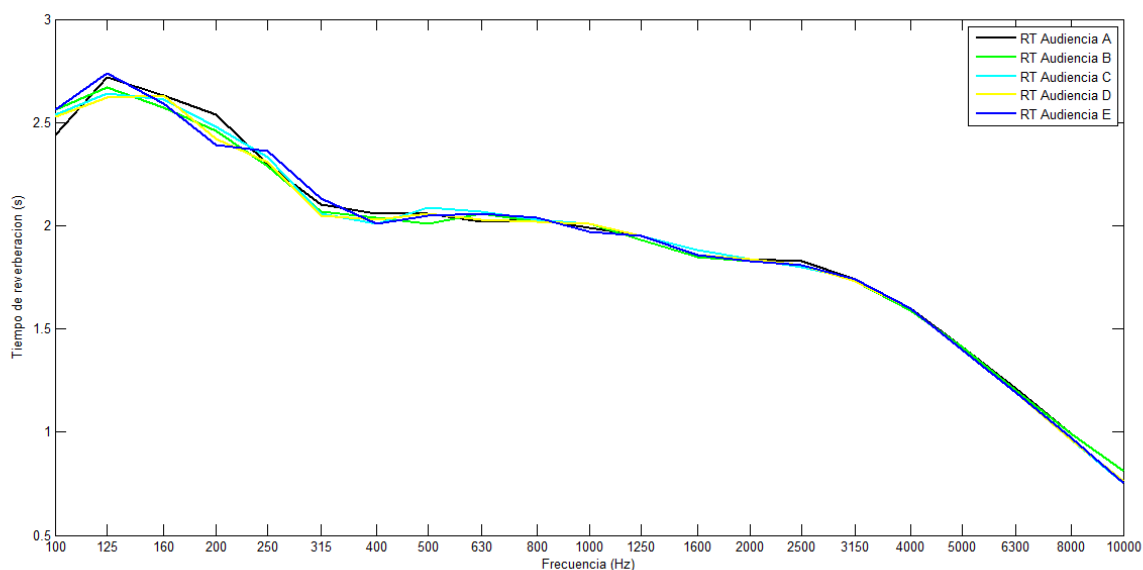


Figura 7.5. Comparación del tiempo de reverberación entre las distintas áreas de audiencia de la sala.

empieza a disminuir debido a la absorción que produce el aire a estas frecuencias.

La normativa establece que se puede calcular un único valor del tiempo de reverberación en frecuencia realizando un promedio sobre las bandas de 1/3 octava de frecuencia central comprendida entre 400 Hz y 1.25 kHz. Realizando este promedio por área de audiencia, se obtienen unos valores $RT_{mid} = 2,01\text{ s}$, $RT_{mid} = 2,02\text{ s}$ y $RT_{mid} = 2,03\text{ s}$.

Como se vió anteriormente, para recintos dedicados a repertorio sinfónico, el tiempo de reverberación medio debe estar comprendido entre 1,8 s y 2 s siempre que el recinto se encuentre ocupado. En un estado de desocupación, como se han realizado las medidas, el tiempo de reverberación recomendado en este tipo de recintos aumenta, llegando a estar recomendados valores entre 1,9 s y 2,4 s. Por tanto, podemos afirmar que la sala (en la configuración estudiada) cuenta con un tiempo de reverberación idóneo para el desarrollo de repertorio sinfónico.

7.2. Resultados aportados por las Simulaciones de EASE

Tras la finalización de la simulación de EASE con el modelo ajustado, podemos observar los diferentes parámetros vistos en el capítulo anterior calculados sobre las áreas de audiencia, en una vista 3D del recinto.

A continuación se evaluarán los diferentes parámetros destinados a una sala para la escucha de música (debido a la suposición inicial de que el espacio está orientado a este propósito) y a los elevados tiempos de reverberación medidos *in situ*, por lo que no se evaluarán aquéllos parámetros relacionados con la inteligibilidad y requisitos necesarios en una sala para la palabra.

Las simulaciones han sido realizadas utilizando las 3 fuentes sonoras omnidireccionales que se definieron sobre el escenario. El uso de estas fuentes viene respaldado por la normativa utilizada, que exige que los parámetros C80, T60, LF, G, EDT sean calculados utilizando una fuente lo más omnidireccional posible. Para el cálculo de los niveles directo y total, el uso de estas fuentes no es el más apropiado, y se deberían utilizar fuentes directivas, de tal forma que se aproximen a la directividad de los instrumentos presentes en una orquesta para la cual se caracteriza el recinto.

En este capítulo no se incluirán todas las gráficas obtenidas en frecuencia de los diferentes parámetros calculados. Por simplicidad, se mostrará la gráfica correspondiente a 1 kHz, pero las gráficas correspondientes a las demás frecuencias pueden ser consultadas en el [Anexo C] de este documento. Todas las gráficas que se mostrarán en lo sucesivo de este capítulo o en el [Anexo C] han sido calculadas en bandas de 1/1 octava.

7.2.1. Direct SPL

El nivel de sonido directo define la distancia del receptor a la fuente sonora. El hecho de observar el valor de este parámetro no aporta demasiada información cuando se observa en solitario.

Para ver el efecto de la atenuación del aire presente en el recinto en función de la frecuencia, para este parámetros se muestran las gráficas de 100 Hz [Figura 7.6] y la de 10 kHz [Figura 7.7] (en lugar de la gráfica a la frecuencia de 1 kHz). Podemos ver que existe una diferencia de unos 15 dB entre el nivel directo del punto más cercano y el más lejano en baja frecuencia (100 Hz), y próxima a 20 dB en la frecuencia más elevada (10 kHz). Esta diferencia se debe a la atenuación mayor del aire a la frecuencia de 10 kHz, afectando sobre todo al punto más lejano, dado que la onda de presión debe recorrer mayor distancia para alcanzarlo.

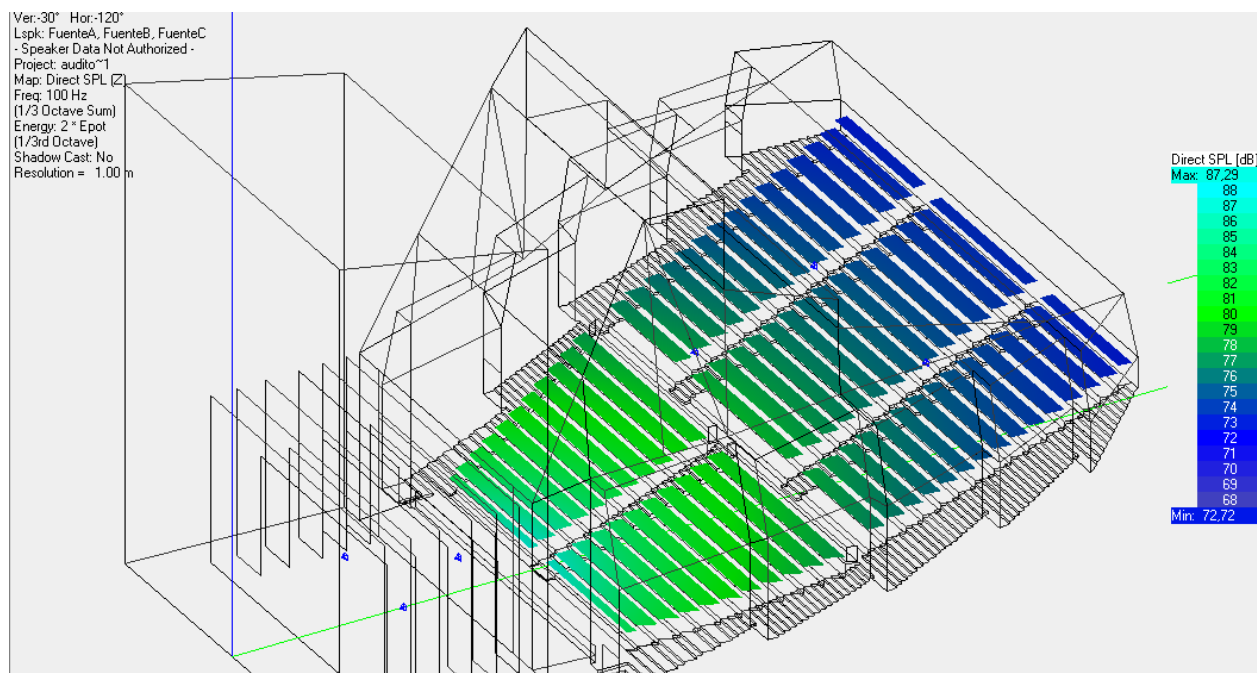


Figura 7.6. Valores del parámetro Direct SPL a la frecuencia de 100 Hz.

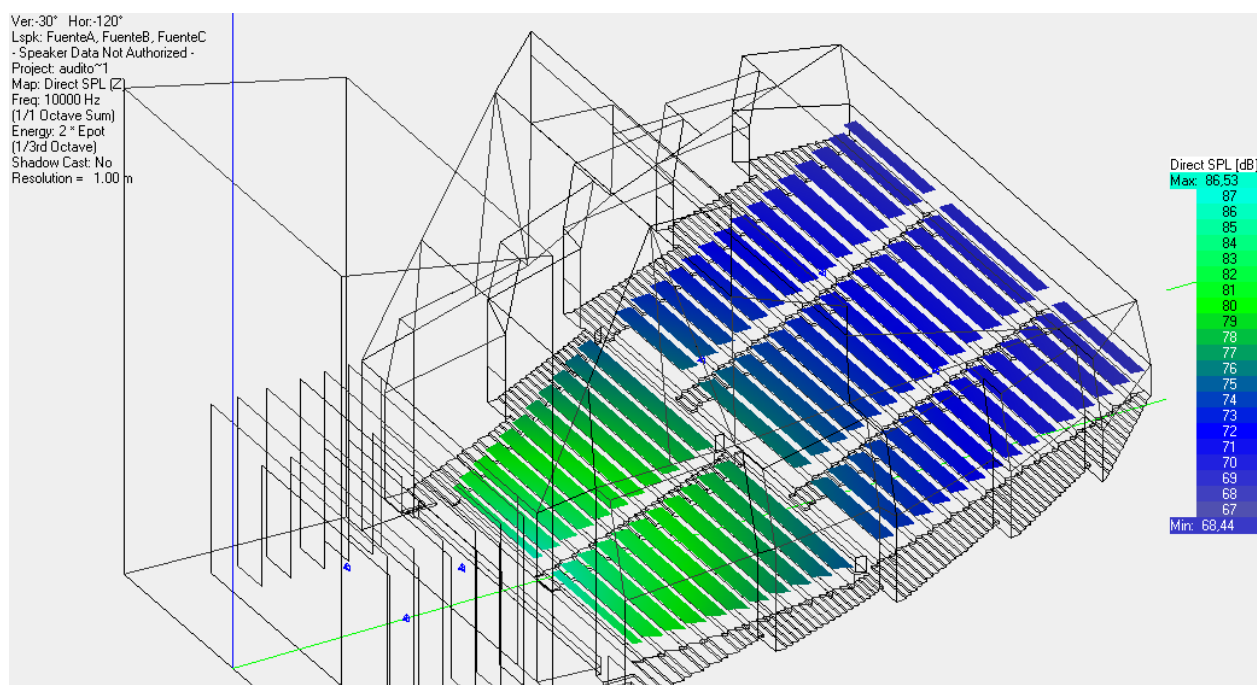


Figura 7.7. Valores del parámetro Direct SPL a la frecuencia de 10 kHz.

7.2.2. Total SPL

El nivel total de presión sonora, en conjunto con el nivel directo nos da información de la importancia del campo directo y del campo reverberante en un punto de la sala.

De esta forma, podemos obtener el área de audiencia donde predomine el campo directo, la distancia crítica y el área donde predomine el campo reverberante. Además, podemos comprobar que no hay demasiada diferencia de nivel de presión entre el punto con nivel SPL máximo y el mínimo.

Así, podemos observar que en baja frecuencia y en la zona de la audiencia más cercana al escenario se obtiene un nivel similar entre el campo directo y el campo reverberante. En alta frecuencia esto no sucede, obteniéndose en las primeras filas un nivel superior del campo directo y, por tanto, estando la distancia crítica sobre el área de audiencia.

También, gracias al efecto del campo reverberante se obtiene una diferencia de nivel menor entre el punto más cercano a la fuente y el punto más alejado, no siendo esta diferencia superior a 10 dB en ninguna frecuencia.

Como cabe de esperar en un recinto orientado a la música, se obtiene un nivel de campo reverberante muy alto en todo el recinto. Desde el punto de vista de los materiales estudiados en el recinto es compresible, dado que en la zona de audiencia sólo las butacas proporcionan un coeficiente de absorción acústica elevado.

En la [Figura 7.8] podemos observar el nivel total de presión obtenido en la banda de 1/3 de octava de frecuencia central 1 kHz.

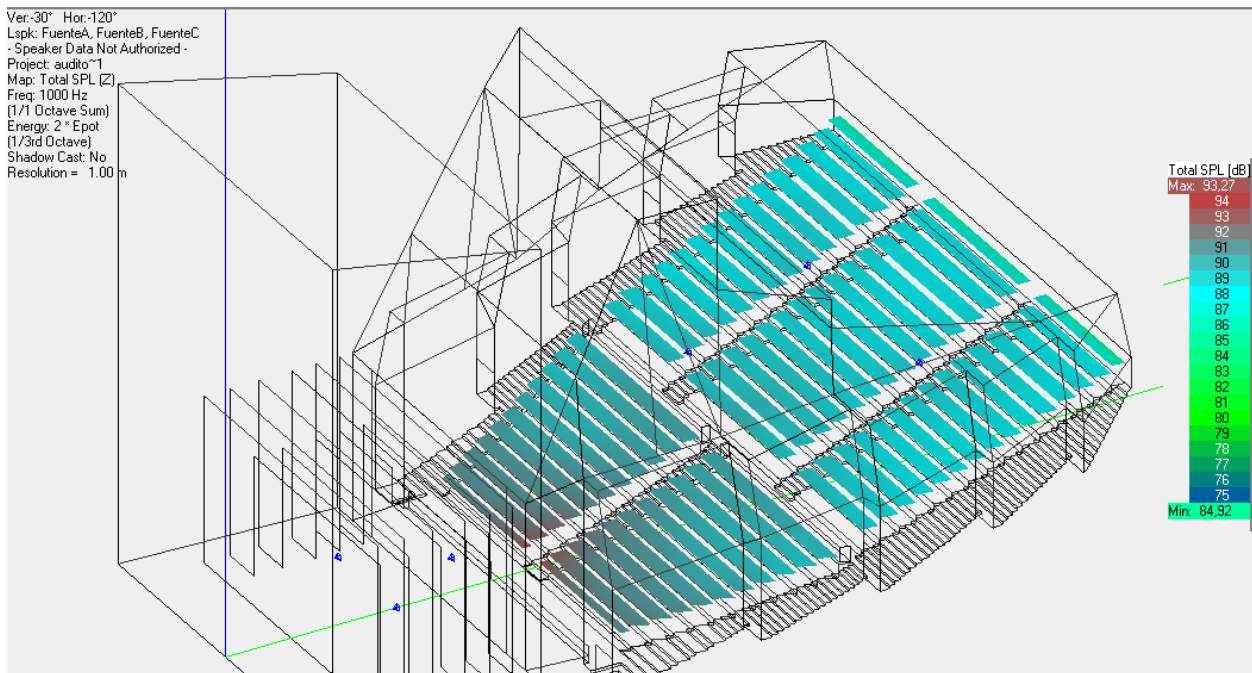


Figura 7.8. Valores del parámetro Total SPL a la frecuencia de 1 kHz.

7.2.3. T30

Para el cálculo del tiempo de reverberación, se ha usado el parámetro T30, que presenta un error en su cálculo menor que el T20 y el T10 en un recinto como el Auditorio Padre Soler, donde la pendiente del ecograma es prácticamente lineal.

Los valores del tiempo de reverberación que proporciona AURA son tiempos muy constantes en todo el área de audiencia y muy próximos a los obtenidos mediante las medidas de caracterización del modelo. En la [Figura 7.9] podemos observar dicho parecido, con una comparación entre la media de tiempos de reverberación obtenidos de las 5 áreas de audiencia [Tabla 7.4] y el promedio obtenido de la simulación de AURA.

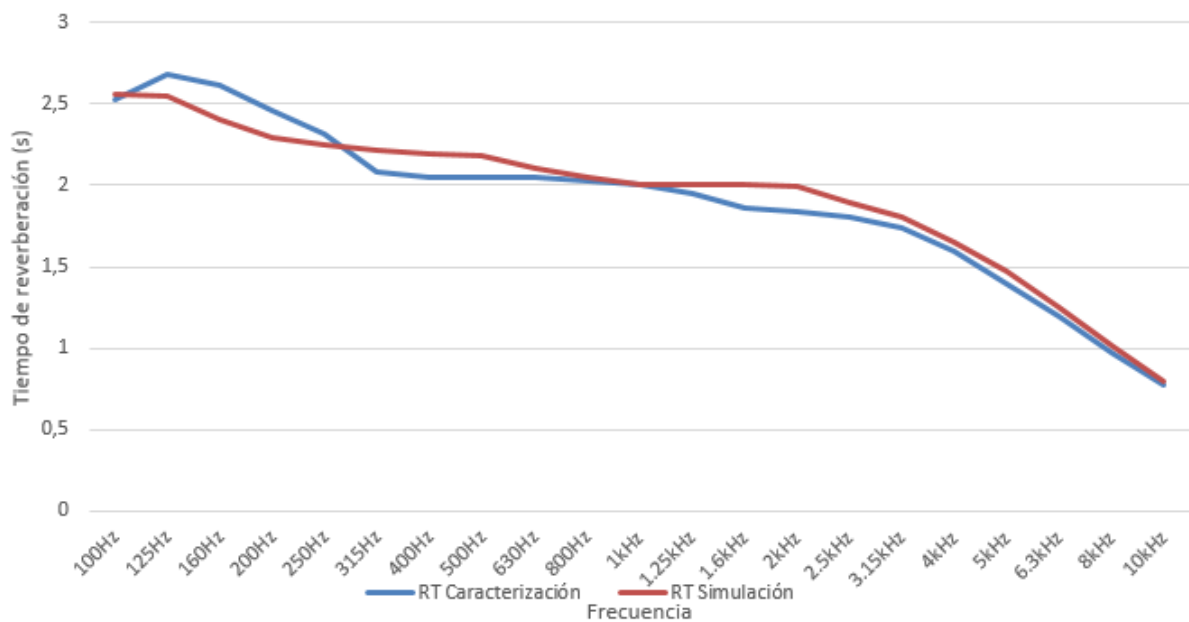


Figura 7.9. Comparación entre el tiempo de reverberación obtenido con las medidas in situ para caracterización y el promedio obtenido de la simulación de AURA.

Utilizando dicho promedio que ofrece AURA, podemos calcular el valor de RT_{mid} con el promedio del tiempo obtenido en las bandas de octava de frecuencia central 500 Hz y 1 kHz. Dicho promedio lleva a un valor $RT_{mid} = 2,09$ s, ligeramente superior al obtenido mediante las medidas de caracterización del recinto. Por tanto, el recinto cuenta con unos tiempos de reverberación altos, de forma que es apropiado para acoger conciertos de música sinfónica, el tipo de música que demanda un tiempo de reverberación más elevado.

En la [Figura 7.10], vemos los resultados en la banda de octava centrada en 1 kHz, y cómo los valores se mantienen muy constantes en todas las áreas de audiencia definidas.

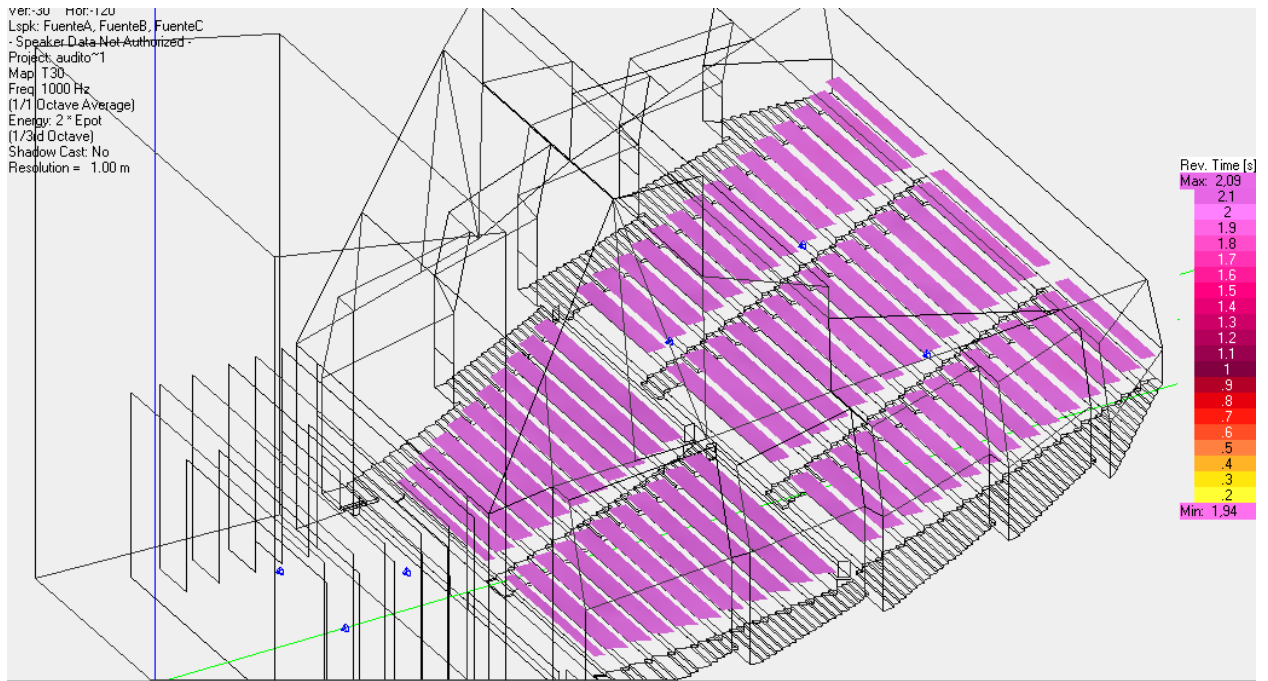


Figura 7.10. Valores del parámetro $T30$ a la frecuencia de 1 kHz.

7.2.4. EDT

El parámetro *Early Decay Time* corresponde al tiempo de caída de 60 dB, a partir de los primeros 10 dB de decaimiento. De esta forma, se tiene un valor más próximo a la sensación de viveza que percibe el oyente del recinto.

Según los datos obtenidos en la simulación, en las filas más próximas al escenario se percibirá una reberveración superior de la existente, en las filas intermedias el valor de la reverberación percibida coincidirá con el valor real, y en las últimas filas del auditorio la reverberación percibida será ligeramente inferior a la existente en el auditorio.

También, es posible obtener un único valor global de este parámetro, EDT_{mid} , con un promedio de los valores obtenidos en las bandas de octava de frecuencia central 500 Hz y 1 kHz. De nuevo, utilizando el promedio que proporciona AURA y estos dos resultados, se obtiene un valor $EDT_{mid} = 1,95$ s. Este valor es del mismo orden que el tiempo de reverberación, obteniéndose una sensación subjetiva de viveza en la escucha similar al valor real que ofrece el tiempo de reverberación.

En la [Figura 7.11] podemos observar los datos obtenidos del parámetro EDT en la banda de octava de frecuencia central de 1 kHz.

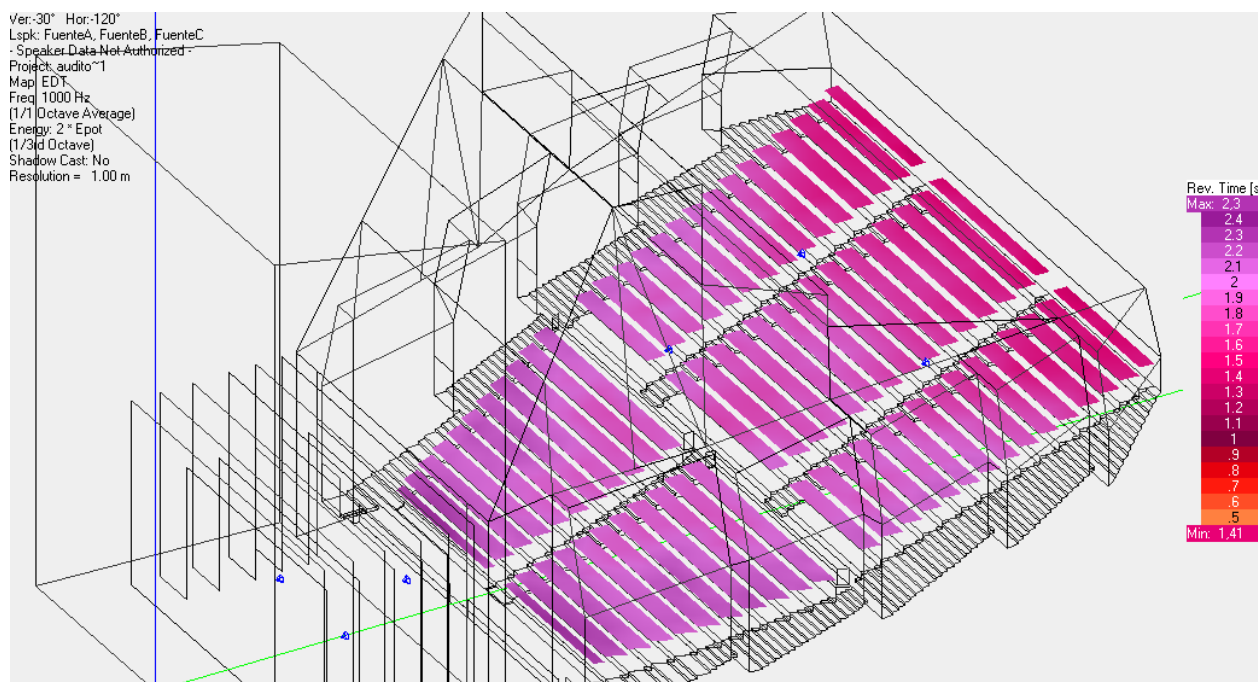


Figura 7.11. Valores del parámetro *EDT* a la frecuencia de 1 kHz.

7.2.5. C80

La claridad define la cantidad de energía recibida en los primeros 80 *ms* frente a la energía tras ese instante. De esta forma, un valor alto de la claridad C80 nos indicará que se concentra mucha energía en los 80 primeros milisegundos, aumentando el nivel total que integra nuestro oído junto con el sonido directo y permitiendo la apreciación de cada componente de la música por separado.

No obstante, no es recomendable un valor demasiado elevado de este parámetro, ya que ello significará que la reverberación tardía es ínfima, lo que no se pretende en una sala de conciertos. Según **Leo Beranek**, el valor aconsejado para el parámetro *Music Average* (promedio del C80 en las bandas de octava de frecuencia central 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz) debe estar entre -4 dB y 0 dB en configuración de sala vacía.

Observando los valores del parámetro C80 en las bandas de octava de frecuencia central comprendida entre 125 Hz y 4 kHz, se puede observar que la claridad aumenta en las primeras y últimas filas, y se mantiene cercana a 0 dB en el resto de la zona de audiencia.

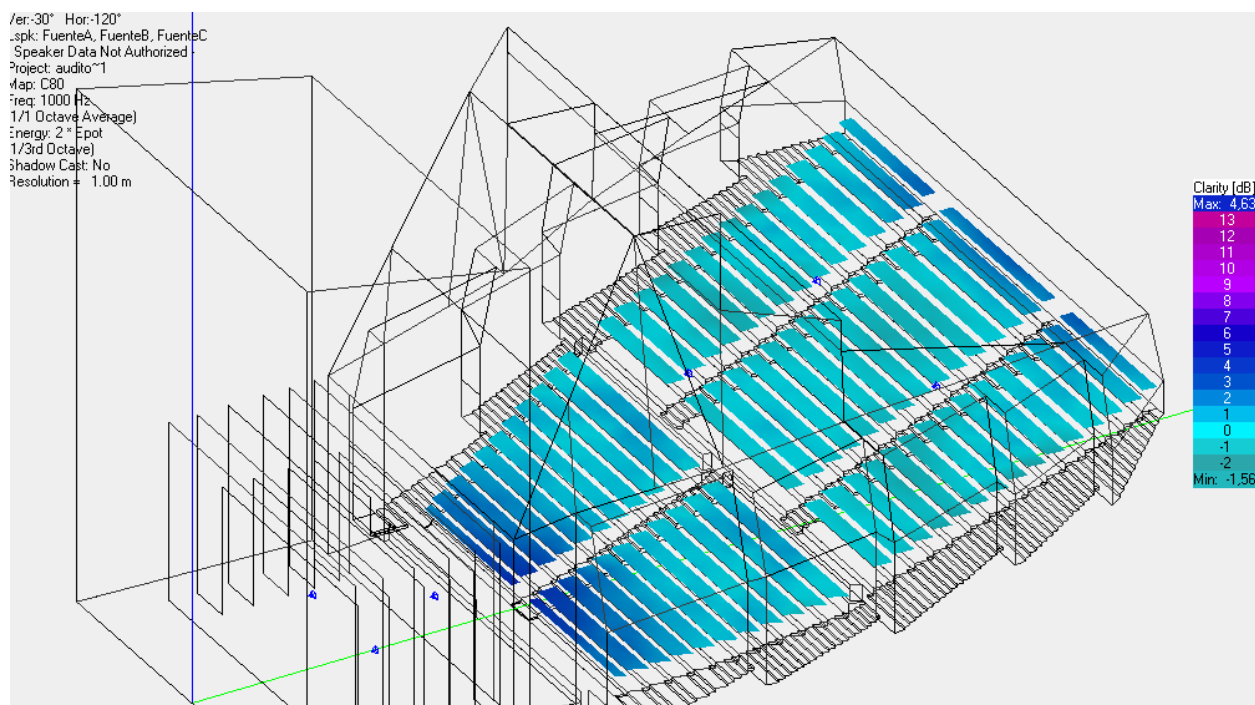


Figura 7.12. Valores del parámetro C80 a la frecuencia de 1 kHz.

Se puede calcular el promedio *Music Average* con el promedio del parámetro C80 a las frecuencias de 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz, obteniéndose un valor $MusicAverage = 0,30 \text{ dB}$. Por tanto, tenemos una sala con un valor de claridad algo más elevado del deseable. Esto se debe a que como se ha comentado, los valores de C80 de las primeras y últimas filas son muy elevados, alejando el valor promedio del óptimo. Por tanto, podemos afirmar que en la mayor parte de la zona de audiencia la claridad apreciada por el oyente es perfecta para la escucha de grandes orquestas.

7.2.6. Lateral Fraction

La *Fracción de Energía Lateral Precoz* define la impresión subjetiva de espacialidad de la fuente. En un recinto para la música interesa que el valor obtenido de este parámetro sea elevado. De esta forma, el oyente tendrá la sensación de estar escuchando una orquesta de dimensiones mayores de la que realmente es. Por ello, se recomienda un valor del promedio de Lateral Fraction en las bandas de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz y 1 kHz superior al 19 % (en configuración de sala vacía). Valores superiores a este mínimo serán muy recomendables, ya que la amplitud aparente de la fuente será mayor, y con ello, subjetivamente, la calidad de la música percibida por el oyente.

El valor del parámetro Lateral Fraction en la banda de octava de frecuencia central 1 kHz se puede observar en la [Figura 7.13].

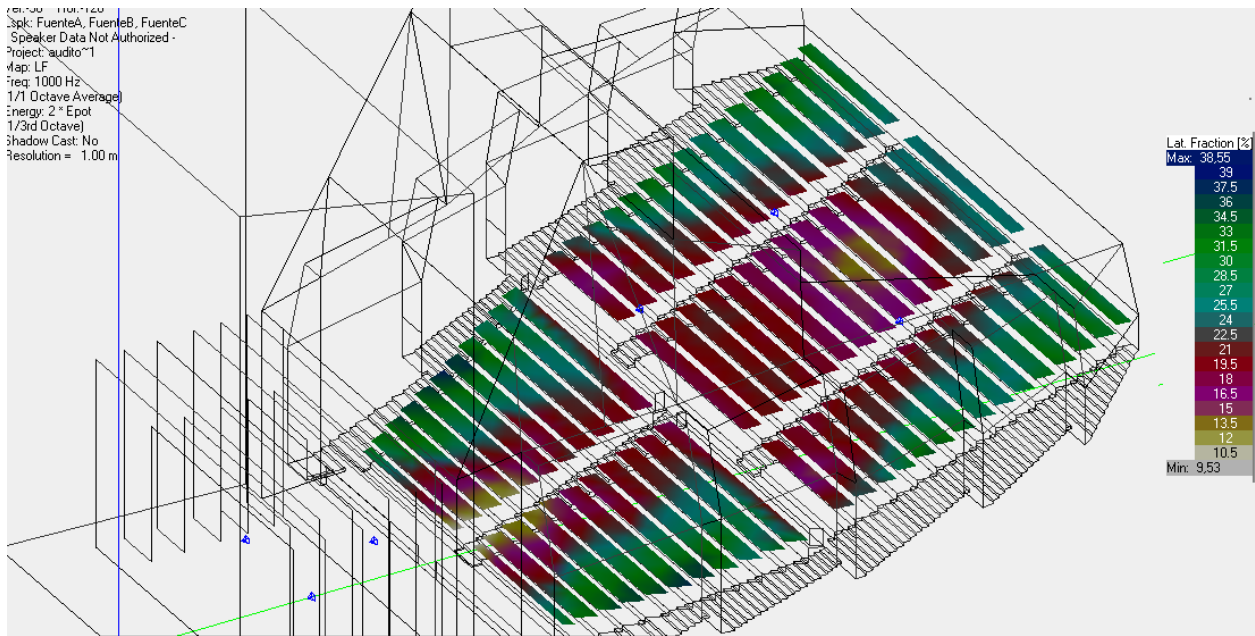


Figura 7.13. Valores del parámetro *Lateral Fraction* a la frecuencia de 1 kHz.

El porcentaje del parámetro LF es mucho mayor en las zonas cercanas a las paredes del recinto, obteniéndose valores cercanos al 30 %, y a medida que se va obteniendo el valor en las zonas equidistantes de las paredes laterales, el porcentaje disminuye hasta obtenerse valores cercanos a 10 – 12 %.

Calculando el promedio del parámetro *LF* en las bandas de frecuencia central 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz y 1 kHz, se obtiene un valor $LF_{mid} = 21,84\%$. Por tanto, se tiene una sensación que la orquesta es mayor de lo que realmente es, especialmente en los laterales de la zona de audiencia y esta amplitud aparente de la fuente es correcta en un recinto para música sinfónica.

7.2.7. Sound Strength

La fuerza sonora (G) proporciona un valor objetivo al nivel sonoro subjetivo apreciado por el oyente. Es muy recomendable que este valor se mantenga constante en todo el espacio de la zona de butacas.

El valor del parámetro *Sound Strength* en las banda de octava de frecuencia central 1 kHz se puede observar en la [Figura 7.14].

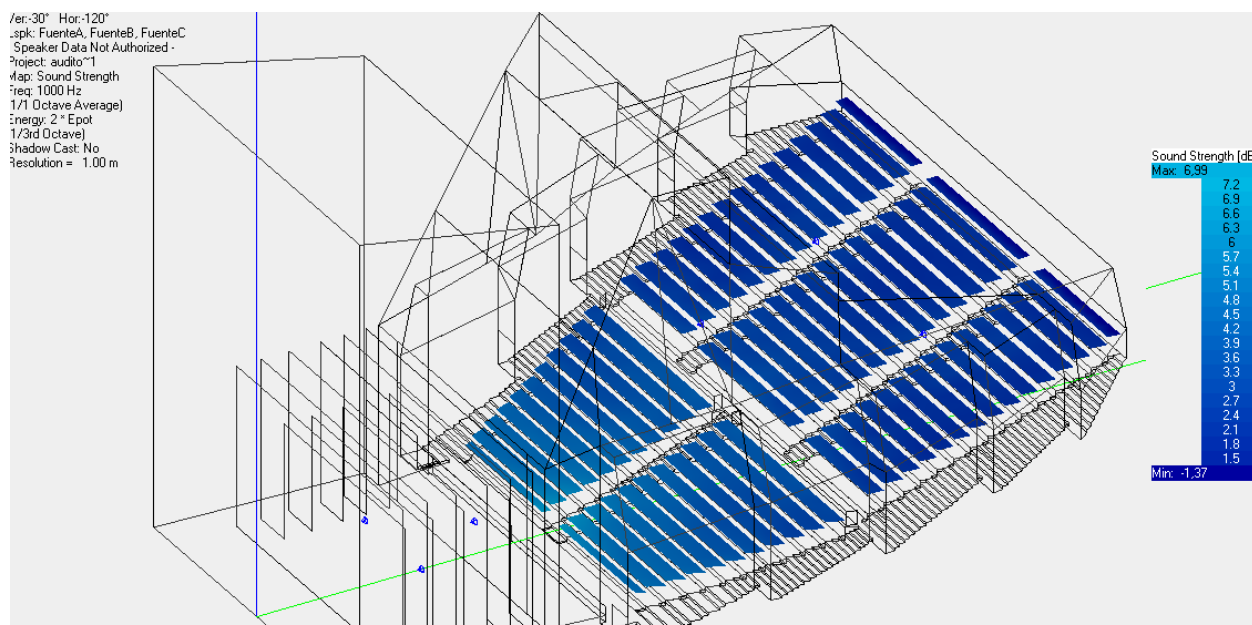


Figura 7.14. Valores del parámetro *Sound Strength* a la frecuencia de 1 kHz.

Observamos que el valor de la fuerza sonora se mantiene cercano a 6 *dB* en las filas más cercanas al escenario, 3 *dB* en las filas intermedias y cercanas a 0 *dB* en los puntos más alejados del escenario. De esta forma, en los peores casos se consigue que el nivel sonoro subjetivo que escuche el oyente sea el mismo que escucharía en campo libre con la fuente a 10 *m*, siendo en estos puntos la distancia al escenario cercana a los 30 *m*.

Para evaluar la idoneidad de un recinto con respecto a este parámetro, **Beranek** recomienda que el promedio del parámetro en las bandas de octava de 500 Hz y 1 kHz y configuración de sala vacía, esté comprendido entre 4 *dB* y 5,5 *dB*. En nuestro recinto, este promedio toma un valor de 3,23 *dB*. Por tanto, en el auditorio, se conseguirá un nivel sonoro subjetivo menor del deseado en cuanto nos alejamos del escenario del mismo.

7.2.8. Echo Music

El parámetro Echo Music, como se ha visto, sirve para identificar si una reflexión con un cierto retraso y energía puede causar una disminución de la calidad escuchada mediante la identificación de un eco. El valor límite de 1,8 del que se hablaba en el capítulo anterior es el valor para el cuál aproximadamente un 50 % de las personas identificarían un eco. Valores superiores a 1,5 deben ser estudiados, y valores menores reducirán en gran medida la probabilidad de una escucha incómoda a causa de los ecos.

Los diferentes valores del parámetro Echo Music en la banda de octava de frecuencia central comprendida 1 kHz se puede observar en la [Figura 7.15].

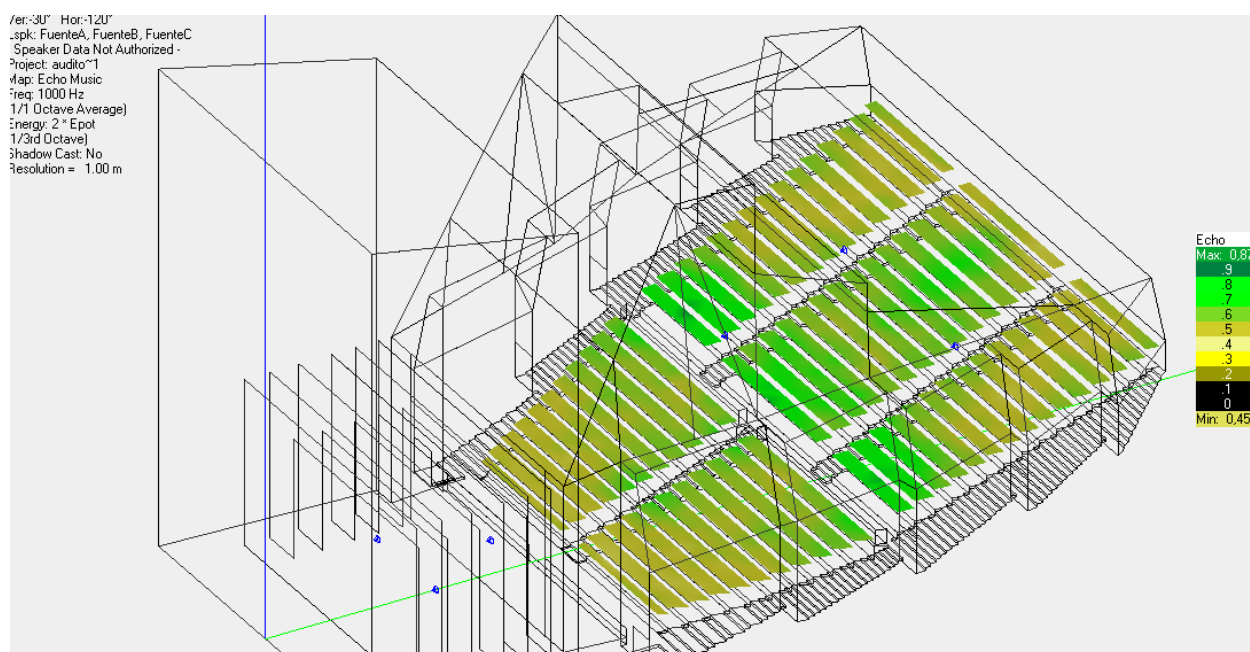


Figura 7.15. Valores del parámetro *Echo Music* a la frecuencia de 1 kHz.

De las figuras del *Echo Music* incluidas en el [Anexo C], podemos concluir que no existe un valor elevado del parámetro *Echo Music* a ninguna frecuencia, descartando la posibilidad de que una reflexión de nivel elevado perjudique la escucha en el interior del auditorio.

Chapter 8

Conclusions

During this project, an acoustic study of Padre Soler Auditorium, located in Leganés, has been performed. This study consists in an acoustic simulation of the enclosure using EASE software, obtaining the most representing parameters, and acoustic measurement measurements performed *in situ*, both for adjusting the virtual model used in the simulations, and also to characterize the reverberation time and noise floor in the room.

Based on the parameters obtained by *in situ* measurement and the different simulations, we can end with a conclusion about the quality of the Auditorium and which kind of events are going to be the most indicated for being performed.

In the studied configuration, the Auditorium is a suitable room for symphonic repertoire, because of the high value of the reverberation time. The subjective sensation of reverberation is similar as the real reverberation. The listener will hear the sound from the orchestra with a high level of clarity, differentiating every component of the source. The imaginary acoustic image of the orchestra will be wider than the real orchestra is, and the quality of listened music will be increased. As the only big fault detected in the room with that configuration is that the sound pressure level received by the listener is poor when the listener isn't near to the stage. However, we can end saying that the Auditorium studied in this document has acoustic properties that makes it suitable for large orchestra concerts and the listener will assess the acoustic of the room in a very positive way.

As future work, would be interesting to study the reason for the existence of an outlayer in the Audience Area A, where the reverberation time obtained at the frequency of 100 Hz is lower than the other values *in situ* measured. The study of the room with a different configuration would be useful to evaluate the effect of the different changes on the acoustic field. For example, would be useful to see the effect of lowering the ceiling of the proscenium, lower the orchestra pit or even study the Auditorium with a bandshell at the stage. Also, it would be interesting to try to improve the model, specially at the stage, and to change the material called *Revestimiento Textil de Muros* to another one that fits better the current material on the enclosure. Finally, to make a subjective study of the users response to the Auditorium's acoustic by means of survey forms, with

the intention of verify if the objective acoustic information obtained in this document matchs with the subjective sensation that a listener has.

While I was writing this project, I was told that an acoustic study of the Auditorium had already been made by a external company. It would be interesting to evaluate that study, to look at the methodology used and to compare the results from both studies. Also, the inspection of that study can provide more information about Padre Soler Auditorium.

Capítulo 9

Marco Regulador, Planificación y Presupuesto

9.1. Marco Regulador

La legislación vigente en el campo de la acústica tiene como pilar fundamental el Real Decreto 1371/2007, donde se aprueba el documento “DB-HR Protección frente al ruido”, del Código Técnico de la Edificación. Si bien este documento referencia a aspectos como normativa de medición de niveles de ruido y cumplimiento de objetivos de ruido ambiental, no hace referencia a la medición de parámetros acústicos en grandes salas, como el auditorio estudiado. Por esto, la normativa utilizada para realizar el estudio acústico en este documento ha sido la norma europea UNE-EN ISO 3382-1:2009. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: salas de espectáculos.

La normativa internacional detalla el procedimiento de medición, instrumentación necesaria y el método para evaluar los datos y presentar el informe de ensayo, tanto del tiempo de reverberación, como de otros parámetros acústicos de interés. En cuanto a la medida del tiempo de reverberación, la normativa describe dos métodos, el método impulsivo y el método de la fuente interrumpida. Ambos métodos han sido utilizados en este proyecto, para obtener el tiempo de reverberación con dos finalidades distintas (ajuste del modelo y caracterización del recinto).

En los diferentes anexos de la norma se explica el cálculo y presentación de resultados de parámetros derivados de las respuestas impulsivas. Si bien en este proyecto no se han realizado mediciones *in situ* para evaluar estos parámetros derivados de las respuestas impulsivas, mediante la simulación software se han podido obtener datos representativos de estas magnitudes.

9.2. Planificación

El trabajo seguido para este proyecto, por tanto, contará con dos líneas de actuación principales. Por un lado, la simulación software del auditorio. Por el otro, las distintas mediciones tanto para caracterización del recinto, como para aportar datos para proceder al correcto ajuste del modelo

usado en las simulaciones. Por tanto, aunque las dos líneas de actuación son diferentes, estarán relacionadas como se puede ver en la [Figura 9.1].

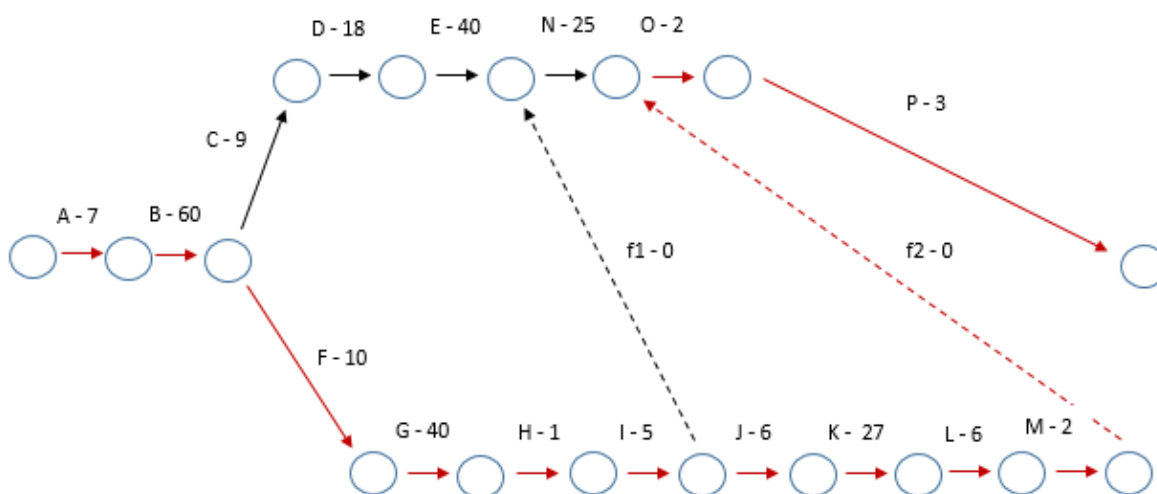


Figura 9.1. Diagrama PERT de la realización del proyecto. En rojo, el camino crítico.

La nomenclatura seguida en el diagrama PERT anterior es la siguiente: *Actividad - Duración en días*. Las distintas actividades, codificadas mediante letras son las siguientes.

A: Recopilación de bibliografía sobre el campo de la acústica arquitectónica.

B: Lectura y estudio de la bibliografía recopilada. Aprendizaje de los conceptos básicos para la realización de este proyecto.

C: Recopilación de planos (tanto en papel como formato AutoCAD) sobre el auditorio Padre Soler.

D: Obtención de los permisos necesarios y medida *in situ* de las dimensiones del auditorio por medio de un metro láser.

E: Construcción de la geometría del recinto mediante software, utilizando EASE.

F: Obtención del equipo necesario para las mediciones acústicas dentro del recinto.

G: Obtención de los permisos necesarios para la realización de las mediciones acústicas y pruebas de la medición con el método impulsivo y globos de diferente diámetro.

H: Medición *in situ* con el método impulsivo para el ajuste del modelo.

I: Recopilación de los datos obtenidos con el método impulsivo y procesado de los mismos.

J: Obtención de los permisos para la realización de las mediciones acústicas y medición con el método de la fuente interrumpida para la caracterización del auditorio.

K: Recopilación de los datos obtenidos con el método de la fuente interrumpida y procesado de los mismos.

L: Obtención de los permisos para la realización de las mediciones acústicas y medición del ruido de fondo presente en el auditorio.

M: Recopilación de los datos obtenidos del ruido de fondo y procesado de los mismos.

N: Proceso iterativo de ajuste del modelo para, mediante selección de los materiales adecuados,

ajustar el modelo virtual a la realidad existente en el auditorio.

O: Simulación para la obtención de las diferentes propiedades acústicas a partir del modelo virtual.

P: Procesado de los datos obtenidos mediante simulación y obtención de las características acústicas del recinto.

f1 y **f2:** Actividades ficticias, sin duración.

El camino crítico, marcado en el diagrama en rojo, comprende las actividades A, B, F, G, H, I, J, K, L, M, f2, O, P. Por tanto, el mínimo tiempo posible de realización de este proyecto son 169 días. La razón de este tiempo tan elevado es la necesidad del autor de poseer unos conocimientos suficientes en el campo de la acústica arquitectónica que no se tenían antes de empezar el mismo, y las sucesivas pruebas con el método impulsivo, que en un primer momento se pensó utilizar para la caracterización del recinto, pero surgieron inconvenientes de los que se hablará más adelante en este proyecto.

El proceso de medición para el ajuste del modelo, caracterización y ruido de fondo, podrían haber sido procesos realizados en paralelo. Durante la realización de este trabajo, han surgido inconvenientes (imposibilidad de utilizar el método impulsivo para la caracterización del recinto e imposibilidad de obtener el ruido de fondo de las medidas de caracterización), que han dificultado que estas mediciones fueran llevadas a cabo en paralelo. Observando el diagrama PERT, vemos dos relaciones entre los procesos de mediciones acústicas y simulación. El primero de ellos es la necesidad de tener datos del tiempo de reverberación medidos en el recinto para proceder al ajuste del modelo. La segunda relación se debe a que para una buena simulación del recinto mediante EASE, ha sido necesario introducir en el software los datos del ruido de fondo medidos.

9.3. Presupuesto

A continuación se desglosa el presupuesto necesario para llevar a cabo el estudio acústico realizado en este documento, tanto costes de mano de obra, como costes de equipación.

Item	Coste unidad/diario (€)	Unidades/días	Total (€)
Licencia EASE Standard	1760	1	1760
Módulo AURA de EASE	800	1	800
Alquiler altavoz dodecaédrico y trípode	45	2	90
Alquiler de la etapa de potencia	15	2	30
Generador de ruido rosa	25	1	25
Alquiler del analizador sonoro	50	10	500
Globos usados para el método impulsivo	0,46	150	70
Salario de ingeniero (valores por día)	78,3	50	3915
Documento informativo a cliente	350	1	350
Total de importe			7540

Tabla 9.1. *Presupuesto necesario para la realización de este proyecto.*